



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

DAVID HUSAINI
SILLAN PIENOISMALLIN SUUNNITTELU PUUKOMPOSIITISTA,
3D-TULOSTUS JA KOEKUORMITUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 25. syyskuuta
2017

TIIVISTELMÄ

David Husaini: Sillan pienoismallin suunnittelu puukomposiitista, 3D-tulostus ja koekuormitus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 71 sivua, 2 liitesivua

Helmikuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen

Avainsanat: 3D-tulostus, FDM-menetelmä, silta, puukomposiitti, koekuormitus, pienoismalli

Komposiittirakenteisten siltojen etuina perinteisistä materiaaleista rakennettuihin on niiden suuri lujuus- ja jäykkyyssuhteiden suhde. Suuren esivalmistusasteen ja kevyen oman painon ansiosta, sillat voidaan valmistaa etukäteen tuotantotehtaalla ja kuljettaa kokonaisina asennettavaksi suoraan perustusten varaan tarvitsematta etukäteen kasaamista ja työmaan perustamista. 3D-tulostuksen myötä, voidaan kevyille komposiittirakenteisille silloille tuoda lisähyötyarvoja materiaalin muokkauksen ja uusien muotojen kautta. 3D-tulostetuilla rakenteilla ei ole rajoitteita, vaan materiaalia voidaan pursottaa suunniteltuihin kohtiin luoden aikaan uusia rakenteita. Tämän tutkimuksen päätavoitteina oli tutkia, voidaanko 3D-tulostamalla luoda luja siltarakenteen pienoismalli ja lisäksi tutkittiin mahdollisuutta isompien siltarakenteiden 3D-tulostamiseen. Lisäksi muina tavoitteina oli selvittää 3D-tulostuksen tuomia lisäarvoja sillansuunnitteluun ja -rakentamiseen.

Tutkimuksessa käytettiin lähdemateriaalina artikkeleita, ohjeita ja kirjoja, jotka liittyivät komposiittimateriaaleihin ja niiden 3D-tulostukseen. Kirjallisuusselvityksessä käsiteltiin laajempaan kokonaisuuteen kevytrakenteisia, kuitulujitteisia siltoja ja 3D-tulostamista tutkimuksessa käytetyllä menetelmällä. Myös 3D-tulostuksen nykytilaa käytiin läpi silta- ja rakennusosalalla. Laskennallisessa tarkastelussa määritettiin siltarakenteen kestävyysanalyysi tekemällä laskennat FEM-analyysillä määrättyillä kuormilla ja geometrialla. Laskentaosuuden perusteella 3D-mallista 3D-tulostettiin pienoismalli, jota koekuormitettiin UPM:n tutkimuslaboratoriossa. Koekuormituksen tuloksia verrattiin lopussa pienoismallin laskentamallin tuloksiin.

Tutkimuksen aikana havaittiin, että 3D-tulostamalla voidaan luoda uusia muotoja, jotka ovat hyvin vaikeita, jollei mahdollon valmistaa perinteisillä menetelmillä. Tässä tutkimuksessa onnistuttiin luomaan kennolevyrakenteinen pienoismalli, joka osoittautui kestäväksi. Tulevaisuudessa voitaisiin toteuttaa yhä suurempia 3D-tulostettuja siltamalleja ympäristöystävällisestä materiaalista. Toimenpidesuosituksina havaittiin, että 3D-tulostettavan kappaleen mallinnusta tarkentaisi sopivat lisäosat, joilla voitaisiin mallintaa suoraan 3D-tulostettava rakenne kaikkine tulostusasetuksineen ja rakenteineen. Nyt tässä tutkimuksessa toteutuneen kennolevyrakenteisen pienoismallin ydinaineelle arvioitiin tietyt mitoituksessa käytetyt parametrit, joita käytettiin laskentamallissa. Tutkimuksessa käytetty materiaali oli tarkoitukseen riittävän lujaa. Vielä lujempiin siltarakenteisiin päästään käyttämällä 3D-tulostetuissa rakenteissa jatkuvia kuitulujitteita, joiden avulla voidaan saada täysi hyöty komposiittirakenteisista silloista.

ABSTRACT

David Husaini: Design of a miniature wood-plastic composite bridge, 3D-print and proof stress

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 71 pages, 2 Appendix pages

February 2017

Master's Degree Programme in Department of Civil Engineering

Major: Structural design

Examiner: Professor Anssi Laaksonen

Keywords: 3D printing, FDM-method, bridge, wood-plastic composite, proof stress, miniature

Advantages of composite-based bridges compared to the ones built from traditional materials are in great strength and stiffness to weight ratio. Due to their possibility to pre-fabricate and lightweight, bridges can be prebuilt in factories and transported whole to be installed straight on their foundations without the need of assembling and establishing a building site. In addition, 3D printing adds value to composite based bridges as material used to build them can be shaped in a desired way and the possibility of using new kinds of shapes occurs. 3D printed parts don't have restrictions. 3D printing enables material to be extruded to designed parts creating new kinds of structures. The main goal of this study was to examine the possibility of creating a tough miniature of a bridge and the possibility of producing larger bridge structures. Other goals were to examine the additional values that can be found in bridge designing and building with 3D printing technique.

The source used in this study consisted of articles, instructions and books addressing composite materials in general and 3D-printing of composite materials. In the literature survey light weighted fibre reinforced composite bridges and 3D printing method used in this study were introduced. Also, the present state of 3D printing in bridge and construction field was presented. In the computational definition, endurance-analysis of the designed part was defined with the help of FEM-analysis using the designed load and geometry values. With the results of the computational definition, a miniature of 3D model was then 3D printed, that was proof stressed in the study laboratory of UPM. Results of the proof stressing were compared to the results of computational definition.

During this study one of the main discoveries was that with 3D printing new kinds of shapes can be created that would otherwise be hard if not impossible to create with traditional methods. In this study, a cellular board was successively created that proved durable. In the future, even greater 3D printed bridge structures could be manufactured from environmental friendly material. As measure recommendations 3D-printed models would be more precise with additional plugins that would enable to 3D model a 3D-printable part with the exact printing settings and structures. In this study the parameters for the core of the miniature were estimated. The material used in this study was adequate enough for the cause. Stronger bridge structures can be created by using continuous fibre reinforcement by which the full advantage of the composite structures can be utilized.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan maisteriohjelmaan. Tutkimuksessa oli visiona hyödyntää mullistavaa teknologiaa rakennus- ja silta-alalla. Lopputuloksena syntyi puolimetrisen 3D-tulostettu pienoismalli, jolle asetetut vaatimukset suunnitteluvaiheissa täyttyivät erinomaisesti.

Haluan kiittää toimeksiantajaani Insinööritoimisto Suunnittelukide Oy:tä haastavan, mutta hyvin mielenkiintoisen työn mahdollistamisesta. Työn aikana oli toisinaan hetkiä, jolloin ison kappaleen suunnittelu, mallinnus, jatkosuunnittelu, testaus, 3D-tulostaminen ja koekuormitus yhden diplomityön aikana tuntui liian isolta palalta haukattavaksi, varsinkin kun asia oli ennestään hyvin tuntematon. Tällöin kannustusta ja neuvontaa sain aina tarvittaessa yrityspuolen ohjaajaltani Jarmo Niemeltä. Kiitokset myös yliopiston puolella ohjaajalleni professori Anssi Laaksoselle, joka ohjasi työtä oikeaan suuntaan.

Yhteistyökumppaneina oli myös muita yrityksiä ja asiantuntijoita. Materiaalipuolesta vastasi UPM ja Eve Saarikoski, joiden kanssa yhteistyössä ratkaistiin tulostusasetukset ja järjestettiin koekuormitus. 3D-tulostuksen haasteissa ja laitepuoleen liittyvissä asioissa käännyin useaan otteeseen 3DStep:n Pekka Ketolan puoleen. Haluan esittää lämpimät kiitokset kaikille osapuolille, jotka mahdollistivat tämän poikkitieteellisen työn toteutumisen saumattomalla yhteistyöllään.

Kiitokset kaikille kavereille yhteisistä opiskeluvuosista ja myös yliopiston ulkopuolisille ystäville kaikesta tuesta ja kannustuksesta, jota olen saanut opintojen aikana. Ennen kaikkea haluan kiittää tyttöystävääni Martinaa, joka on kannustanut ja valanut uskoa minuun koko opintourani ajan. Kiitokset myös vanhemmilleni ja sisaruksilleni, jotka ovat autta-
neet pitämään jalat maassa silloinkin, kun opiskeluaika on tuntunut vauhdikkaalta.

Turussa 20.2.2018,

David Husaini

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset	3
1.4	Tutkimuksen suoritus	3
2.	KEVYTRAKENTEISET SILLAT KOMPOSIITISTA.....	4
2.1	Mitä komposiitit ovat?	4
2.2	Kuitulujitetun komposiitin käyttö silloissa	6
2.2.1	Edut ja haitat perinteisiin materiaaleihin nähden	8
2.2.2	3D-tulostettu komposiittirakenteinen silta	10
2.3	Esimerkkejä rakennetuista komposiittisilloista	13
2.3.1	Ekin silta	13
2.3.2	Oschatzin kevyen liikenteen silta.....	14
2.3.3	ApATeCH:n kevyen liikenteen silta	15
3.	3D-TULOSTAMINEN	17
3.1	3D-tulostusprosessi	17
3.1.1	3D-malli	17
3.1.2	STL-tiedostomuotoon muuttaminen	20
3.1.3	Mallin viipalointi.....	21
3.1.4	3D-tulostus	22
3.2	Materiaalia lisäävä pursotusmenetelmä (FDM)	23
3.2.1	FDM-menetelmän kuvaus.....	24
3.2.2	FDM-menetelmässä käytetyt tulostusmateriaalit.....	26
3.2.3	Tulostusasetukset ja tulostaminen.....	27
3.2.4	Tulostushaasteet ja havainnot 3D-tulostamisesta	29
4.	3D-TULOSTAMINEN RAKENNUSALALLA	31
4.1	Yksityiset toimijat Suomessa	31
4.1.1	FIMAtec	31
4.1.2	3DStep.....	32
4.2	Toimijat maailmalla	34
4.2.1	MX3D	34
4.2.2	WinSun.....	36
4.2.3	Institute for advanced architecture of Catalonia	37
5.	PIENOISMALLIN SUUNNITTELUN JA TOTEUTUKSEN VAIHEET	38
5.1	Lähtötiedot ja suunnitteluperusteet kevyen liikenteen sillan tapauksessa ...	38
5.2	Materiaalitiedot	39
5.3	Suunnittelu tutkimuksen rajauksien mukaisesti	41
5.3.1	Sillan suunnittelu.....	43
5.3.2	Pienoismallin 3D-tulostus	53
5.3.3	Pienoismallin koekuormitus.....	60

5.3.4	Pienoismallin laskentamallin vertaaminen koekuormitustulokseen	
	61	
5.3.5	Sillan laskentamallin päivittäminen.....	64
6.	YHTEENVETO	67
7.	LÄHTEET.....	69

LIITE A: UPM FORMI 3D-TEKNISET TIEDOT

LIITE B: KOEKUORMITUSTULOKSET

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D-tulostus	kolmiulotteinen tulostus
AM	additive manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
CAD	computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
FDM	fused deposition modeling, 3D-tulostusmenetelmä
FEM	eng. Finite element method, elementtimenetelmä
STL	stereolithography, 3D-tulostimien ymmärtämä tiedostomuoto
ABS	akryylinitriilibutadieenistyreeni, 3D-tulostusmateriaali
PLA	polyaktidi, 3D-tulostusmateriaali
ASCII	eng. American Standard Code for Information Interchange, 7-merkkipaikan laajuinen tietokoneiden merkistö

.

1. JOHDANTO

Alaluvussa 1.1 kerrotaan tutkimuksen taustasta ja siitä mihin tämä tutkimus liittyy. Tutkimuksen pää- ja alatavoitteet on esitetty alaluvussa 1.2. Tutkimuksen rajouksista kerrotaan alaluvussa 1.3 ja luvun lopussa alaluvussa 1.4 kerrotaan tutkimuksen suorituksesta.

1.1 Tutkimuksen tausta

Kolmiulotteinen tulostus (3D-tulostus) on virtuaalisen tietokonemallin tuottamista fyysiseksi kappaleeksi 3D-mallin avulla. Periaate on sama kuin kopiokonetulostuksessa, mutta erona on, että 3D-tulostettu kappale tulostetaan suoraan 3D-mallin geometrian mukaiseksi, kun taas kopiokonetulostuksessa tieto on kaksiulotteisena. 3D-mallinnettu kappale voidaan tällöin tulostaa joko skaalattuna tai oikeassa koossaan suoraan 3D-mallin mukaiseksi fyysiseksi objektiksi. 3D-tulostusta käytetään maailmalla paljon prototyyppien ja pienien osien tuottamiseen (Cherkurov, Eklund, Kujanpää, Pekkarinen, Syrjälä, Vihinen 2017; Dudek 2013). Maailmalla on myös tulostettu pieniä asuinrakennuksia, yksi betoninen kevyen liikenteen silta ja rakennuselementtejä rakennusteollisuudessa hyvällä menestyksellä ja teknologia kehittyy jatkuvasti.

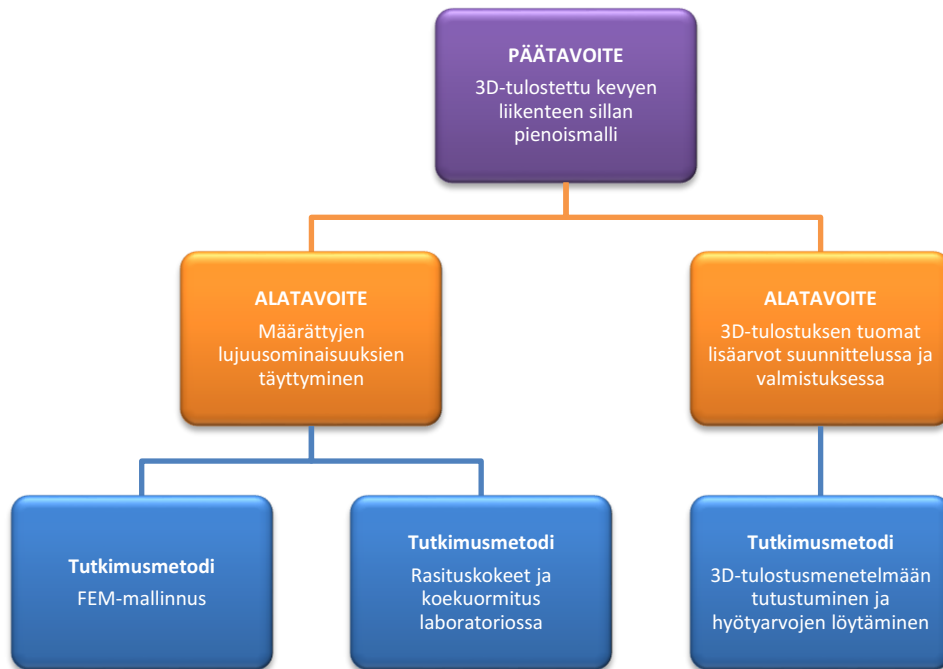
Rakennusteollisuudessa on tarve löytää uusia kestäviä ja ympäristöystävällisiä rakennusratkaisuja. Suurten rakenteiden 3D-tulostus on nopeasti kehittymässä liiketoiminnaksi, sillä rakenteiden 3D-mallinnus, suunnittelu ja 3D-tulostus mahdollistavat uudenlaisen tavan muovata materiaalia haluttuun muotoon. Kaarevien, kevyiden sekä materiaaliltaan optimoitujen rakenteiden tulostus tehostaa tuotantotapoja, optimoi materiaalin käyttämistä sekä mahdollistaa suunnittelijalle vapauden luoda monimutkaisia rakenteita, jotka perinteisillä koneistusmenetelmillä on mahdotonta tai hyvin vaikeita toteuttaa.

Tämä tutkimus on osa projektia, jonka tarkoituksena on tutkia isojen rakenteiden 3D-tulostusmahdollisuutta. Materiaalina käytettiin UPM:n Formi 3D-komposiittia, joka koostuu PLA-muovista sekä selluloosakuiduista. Puukomposiitin 3D-tulostus tarjoaa mahdollisuuksia luoda suurikokoisia sisä- ja ulkorakenteita ympäristöystävällisellä ja kustannustehokkaalla menetelmällä.

Tutkimuksen luvussa kaksi käsitellään siltoja laajemmassa kontekstissa keskittyen komposiiteista rakennettuihin kevyen liikenteen siltoihin. Luvussa kolme kerrotaan 3D-tulostusprosessista ja siihen liittyvistä käsitteistä. Luvussa neljä esitetään 3D-tulostamista rakennusalalla. Luvussa viisi käydään läpi tässä tutkimuksessa syntyneen pienoismallin suunnittelu- ja 3D-tulostusprosessia sekä koekuormitusta. Työn tärkeimmät tulokset tiivistetään luvun kuusi yhteenvedossa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli 3D-tulostaa lujuustestattu kevyen liikenteen sillan pienoismalli puumuovikomposiitista. Tutkimuksen alatavoitteina oli määrättyjen lujuusominaisuuksien täyttyminen pienoismallille sekä 3D-tulostuksen tuoman lisäarvon selvittäminen sekä sen hyödyntäminen suunnittelussa ja valmistuksessa.



Kuva 1. Tutkimuksen tavoitteet.

Aiheeseen perehdyttäessä huomattiin 3D-tulostuksen tuovan uusia hyötyjä ainetta poistavaan tuotantomenetelmään verrattuna. Näitä tutkimuksen aikana syntyneitä innovaatioita hyödynnettiin lopullisen pienoismallin suunnittelussa ja toteutuksessa.

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Projektin pitkäkestoisen luonteen takia, tähän tutkimukseen rajattiin koskemaan ainoastaan yhden pienoismallin suunnittelutyö, 3D-tulostus ja koekuormitus. Projekti jatkuu tutkimuksen jälkeen, jolloin lisää pienoismalleja tullaan suunnittelemaan ja koekuormittamaan.

Tutkimuksessa käytettiin materiaalina UPM:n Formi 3D:tä. Muut 3D-tulostukseen tarkoitetut materiaalit rajattiin pois. 3D-tulostimena käytettiin TTY:n avaruuskerho Castorin Megaprinteriä, joka toimii FDM-menetelmällä (eng. Fused deposition modeling). Muita 3D-tulostimia ja -tulostusmenetelmiä ei tässä tutkimuksessa käsitelty.

Laskennallisessa osuudessa tutkittiin pelkästään suunniteltavan sillan taivutuskestävyyttä. Muut tarkastelut rajattiin pois tästä tutkimuksesta.

1.4 Tutkimuksen suoritus

Tutkimus oli kvalitatiivinen tapaustutkimus, joka keskittyi yhden mallin suunnitteluun. Lähtöaineistona käytettiin olemassa olevaa kirjallisuutta. Lähtöaineisto kerättiin TTY:n kirjaston tietokannasta ja kirjastolta.

Tutkimusmenetelmäksi valittiin sillan sekä sen pienoismallin suunnittelu laskennallisesti ja siihen liittyvä koekuormitus, jolla varmistettiin laskentatulosten paikkansapitävyys. Tutkimus suoritettiin suunnitteleamalla 3D-malli puukomposiittirakenteisesta sillasta, joka suunniteltiin kestäämään määrättyä kuormaa murtumatta FEM-menetelmällä (eng. Finite element method) perustuvalla laskentaohjelmalla. Syntyneestä geometriasta luotiin 3D-tulostettu pienoismalli, jota koekuormitettiin laboratoriossa mallin murtumiseen asti. Pienoismallista luotiin myös vastaava laskennallinen malli, jossa käytettiin koekuormituksen murtokuormaa. Saatuja koekuormitustuloksia verrattiin laskentamallin tulosten kanssa, jolloin voitiin arvioida tutkimuksen tavoitteen täyttymistä ja samalla saatiin tietoa materiaalin soveltumisesta isojen lujuutta vaativien rakenteiden toteutuksessa.

Tutkimuksen tuloksia raportoitiin laskelmien sekä taulukoiden avulla. Tuloksissa arvioitiin myös tutkimuksen onnistumista asetettuihin tavoitteisiin nähden.

2. KEVYTRAKENTEISET SILLAT KOMPOSIITISTA

Kevytrakenteisilla silloilla tarkoitetaan tässä kontekstissa siltoja, joissa on saatu luotua kestävä siltarakenne komposiittimateriaaleja käyttämällä ja jonka lujuusominaisuudet vastaavat vähintään perinteisistä rakennusmateriaaleista rakennettuun siltaan. Perinteisiä rakennusmateriaaleja sillanrakentamisessa ovat pitkään olleet teräs, betoni ja puu, joista raudoitettu betoni on nykyäänä käytetyin rakennusmateriaali. 3D-tulostamisen myötä erilaiset komposiittiseokset ovat tulleet markkinoille ja suurin osa FDM-menetelmään (eng. fused deposition modeling, tarkemmin alaluvussa 3.2) perustuvista tulostimista käyttävät muovista ja erilaisista kuiduista koostuvia komposiitteja. Komposiitteja on käytetty rakennusmateriaaleina jo paljon ennen 3D-tulostamista ja ensimmäisiä käyttökohteita oli antiikin egyptiläisillä, jotka käyttivät olkia muta- ja savitiilissä lujitteena (Potyrala 2011).

Komposiiteista saadaan lujia ja kovia rakenteita ja niitä on käytetty teollisuudessa paljon luoden lujia ja kevyitä rakenteita. Komposiittien käytön eduista verrattuna raudoitettuun betoniin ja puun käyttöön löytyy kirjallisuudessa paljon tutkimuksia (Broutman ja Krock 1967; Potyrala 2011; Saarikivi, Handelberg, Holmberg, Matilainen 2009). Komposiiteista kerrotaan alaluvussa 2.1. Komposiitteja on käytetty myös sillanrakennuksessa onnistuneesti, joista kerrotaan alaluvussa 2.2. Tämän luvun lopussa esitetään rakennettuja komposiittisiltoja alaluvussa 2.3

2.1 Mitä komposiitit ovat?

Komposiiteilla tarkoitetaan kahdesta tai useammasta materiaalista koostuvaa materiaalien yhdistelmää, jossa materiaalit eivät ole lienneet toisiinsa tai sulautuneet toisiinsa, mutta toimivat yhdessä luoden yhdistelmälle uusia ominaisuuksia. Syntyvän materiaalin ominaisuudet eroavat ominaisuuksista, jotka lähtömateriaaleilla on toimiessaan erikseen (Broutman & Krock 1967; Potyrala 2011; Saarikivi et al. 2009). Komposiittien käytöllä luodaan yhdistelmiä, joilla on yhdessä toimiessaan hyviä ominaisuuksia esimerkiksi kestävyuden kannalta, joita ei materiaaleilla ole toimiessaan yksittäin.

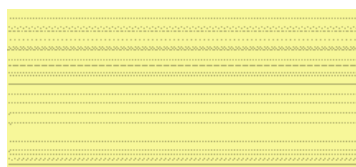
Viime vuosisadan aikana käytetyin rakennusmateriaali, raudoitettu betoni on eräs komposiittirakenne, jossa betoni toimii matriisina ja rauditus lujitteena, joka ottaa vastaan taivutusta (Potyrala 2011). Betoni kestää hyvin puristusjännitystä, mutta huonosti vetojännitystä. Lisättäessä raudoitusta betoniin saadaan jännitystilaksi betonille puristusta ja teräkselle vetoa, jolloin rakenteet toimivat hyvin yhdessä. Luonnossa esiintyy monia komposiitteja, kuten metsien puut ja ihmisten luut. Puu koostuu selluloosakuiduista, jotka kestävät hyvin taivutusta, mutta joustavat hyvin helposti. Toimiessaan ligniinin kanssa komposiitista tulee jäykkä. Luu koostuu luujasta mutta pehmeästä kollageeniproteiinista ja kovasta, mutta hauraasta mineraaliapatiitista (Nicholls 1976). Nykyaikana komposiitteja käytetään niin rakennusteollisuudessa kuten rakennuksissa, silloissa, laiturirakenteissa, teollisuusputkissa (Saarikivi et al. 2009, Ajdukiewicz,

Kotala, Weglorz 2009) kuin korkean teknologian käyttökohteissa kuten ilmailualalla, lentokoneissa, puolustusrakenteissa ja pilvenpiirtäjissä (Potyrala 2011; Nicholls 1976).

Komposiitin perusrakenne on matriisi, johon muut materiaalit sijoittuvat. Matriisi pitää muut komponentit paikallaan ja muut komponentit toimivat matriisiin sijoitettuina lujitteina (Broutman & Krock 1967). Tämän tutkimuksen teoriaosuudessa keskityttiin kuitulujitettuihin komposiitteihin, sillä ne ovat käytetyimpiä rakennus- ja erityisesti sillanrakennusteollisuudessa (Saarikivi et al. 2009; Potyrala 2011; Broutman & Krock 1967; Ajdukiewicz et al. 2009).

Komposiittien matriisina voi olla muoviyhdisteet, metallit, keraamit tai betoni (Nicholls 1976; Potyrala 2011; Ajdukiewicz et al. 2009). Matriisin tehtävänä on toimia komposiitissa liiman tavoin, sitoen lujitekuidut yhteen ja suojata niitä ympäristön aiheuttamilta mekaanisilta ja kemiallisilta rasituksilta. Matriisi siirtää rasitukset kuiduille kitkan ja tartunnan avulla sekä antaa komposiitille jäykkyyden. Näiden lisäksi matriisi antaa lopullisen muodon, värin ja pinnan komposiitille.

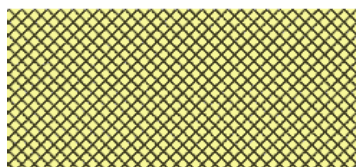
Kuiturakenteen tärkein tehtävä on kantaa rakenteelle syntyvät rasitukset ja lisätä jäykkyyttä, lujuutta, lämmönkestävyyttä ja muita rakenteellisia ominaisuuksia matriisin ohella komposiitirakenteelle. (Broutman & Krock 1967; Potyrala 2011). Kuiturakenteita on hyvin paljon erilaisia eri käyttötarkoituksiin ja tuotantomenetelmiin. Jatkuva kuiturakenne voi olla yksittäisiä filamentteja koko rakenteen osalta (a) tai kudottua mattoa (c). Kuiturakenne voi myös koostua yksittäisistä katkotuista kuiduista, jotka ovat joko suunnattuja tai satunnaisesti aseteltuja matriisiin (b).



(a) Jatkuva kuitu



(b) Katkokuitu



(c) Kudottu matto

Kuva 2. Kuitutyyppit. Lähde: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_5_1.php

2.2 Kuitulujitetun komposiitin käyttö silloissa

Silloissa käytetään matriisina polymeerejä sekä niiden kuiturakenteena hiilikuituja, synteettisiä kuituja ja lasikuituja (Potyrala 2011). Kevytrakenteisissa silloissa voidaan käyttää matriisina perinteisempää rakennusmateriaalia, betonia. Sillanrakentamisessa vaaditaan materiaaleilta mekaanisen ja kemiallisen kulutuksen kestoa. Tästä syystä materiaalivalintoja tehdessä on pidettävä mielessä niiden soveltuvuus rakenteen rasitusolosuhteisiin. Käytettävän matriisin ja kuidun pitää kestää sille kohdistuvat rasitukset muun muassa tiesuolauksesta, lämpötilamuu-
toksista ja kosteusolosuhteista.

Raudoitettu betoni voi karbonatisoitumisen, kloridien, jäätymis-sulamisreaktioiden tai kemiallisten vaikutusten kautta rapautua, jolloin pitkällä aikavälillä betonin lujuusominaisuudet heikentyvät. Siltarakenteiden rapautumisen suurin syy on Potyralan (2011) mukaan terästen aiheuttama korrosio.

Komposiittirakenteita käytettäessä siltarakenteissa ympäristöolosuhteet eivät muutu ja ne pitää edelleen ottaa huomioon eurokoodien mukaisessa rasitusluokkien määrittämisessä. Siltarakenteissa käytetään vain sellaisia kuiturakenteita, jotka eivät reagoi kemiallisesti aiheuttaen materiaalin ominaisuuksien heikentymistä. (Ajdukiewicz et al. 2009; Potyrala 2011). Muovikuiduissa on lasi- ja teräskuituihin verrattuna etuna kemiallinen reagoimattomuus (Saarikivi et al. 2009).

Taulukkoon 1 on koottu nykypäivänä käytetyimpiä lujitekuitumateriaaleja ja esitetty niiden lujuusominaisuuksia. Hiilikuidun kohdalla lyhenteet HS ja HM tulevat englannin kielestä high strenght ja high modulus, eli korkealujuuksinen ja korkeamoduulinen hiilikuitu.

Taulukko 1. Kuitulujitteiden ominaisuudet. Suomennettu lähteestä Potyrala (2011).

Ominaisuudet	Kuitu					
	Lasi		Aramidi		Hiili	
	E-lasi	S-lasi	Kevlar 29	Kevlar 49	HS	HM
Tiheys [kg/cm^3]	2,60	2,50	1,44	1,44	1,80	1,90
Kimmomoduuli [MPa]	72	87	100	124	230	370
Vetolujuus [GPa]	1,72	2,53	2,27	2,27	2,48	1,79
Murtovenymä [%]	2,40	2,90	2,80	1,80	11,0	0,50

Korkealujuushiilikuidun ja S-lasikuidun vetolujuudet ovat noin viisinkertaiset betonin raudoituksessa käytettyyn teräkseen verrattuna.

Kuitulujitteiset komposiitit ovat lujuuspaino- ja jäykkyyspainosuhteiltaan monin kerroin paremmat perinteisiin rakennusmateriaaleihin nähden. Vertailua komposiittien ja muiden rakennusmateriaalien kesken on tehty taulukossa 2. Esimerkiksi ortotrooppisen hiilikuitulujitetun muovin (eng. carbon fiber reinforced polymer, lyhenne CFRP) kimmomoduuli vastaa teräksen kimmomoduulia, mutta on tiheydeltään vain viidesosan teräksestä. Samankokoisilla teräs- ja hiilikuitulujitetulla polymeerillä on siis yhtä suuri jäykkyys, mutta teräsosa painaa viisi kertaa enemmän.

Lasikuituvahvistettu polymeeri (englanniksi glass fiber reinforced polymer, lyhenne GFRP) on kimmomoduuliltaan terästä huonompi, mutta vetolujuudeltaan parempi. Sitä käytetään CFRP:tä enemmän, sillä se kestää leikkausjännityksiä paremmin ja materiaalikustannukset ovat huomattavasti pienemmät.

Taulukko 2. Komposiittimateriaalien vertailua tavallisiin materiaaleihin. Suomennettu lähteestä Potyrala (2011).

Ominaisuudet	Materiaali					
	Duraluminum	Titaani TiA 16Va4	Teräs St52	GFRP	CFRP 60 % tilavuusosuus	CFRP 80 % tilavuusosuus
Tiheys ρ [g/cm ³]	2,80	4,50	7,80	2,10	1,50	1,70
Vetolujuus R_m [MPa]	350	800	510	720	900	3400
Suhteellinen lujuus R_m / ρ [MPa x cm ³ / g]	125	178	65	340	600	2000
Kimmomoduuli E [GPa]	75	11	210	30	88	235
Suhteellinen kimmomoduuli E/ ρ [GPa x cm ³ / g]	27	2	27	14	59	138

Ajdukiewicz et al. (2009) huomasivat tutkimuksessaan betonin kanssa hyvin toimivana lujitteena hiilikuidun, kun taas lasikuitujen yhtä hyvää hyötyä kuiturakenteessa ei saatu aikaiseksi. Lasikuidut eivät saavuttaneet täyttä vetolujuuttaan rasitettaessa. Tätä selitetään osittain sillä, että kuiturakennetta ei saatu yhtenäiseksi ja sidos matriisiin oli puutteellinen. Tutkimuksessa esitetään ratkaisuksi kuitujen impregnoimista, jolla voitaisiin saavuttaa lujitteilla parempi tartunta matriisiin.

2.2.1 Edut ja haitat perinteisiin materiaaleihin nähden

Kuituvahvistetulla komposiitilla saavutetaan monia etuja perinteisiin materiaaleihin nähden, mutta niiden käyttö ja standardisointi vaativat lisätutkimuksia. Muun muassa materiaalien korkea hinta ja suunnitteluohjeiden sekä -standardien puuttuminen luovat omat haasteet komposiittien käyttämiselle sillanrakentamisessa, jossa materiaalien käyttö on hyvin tarkkaan eri suunnitteluohjeiden ja sääntöjen määrittelemää. Potyrala (2011) listaa kuituvahvistetun komposiitin hyödyt perinteisiin materiaaleihin nähden tutkimuksessaan, johon perustuen on alla oleva taulukko 3 luotu.

Taulukko 3. Kuitulujitetun komposiitin edut ja haitat perinteisiin rakennusmateriaaleihin nähden. Perustuu lähteeseen: Potyrala (2011).

Edut +	Haitat -
Lujuus ja jäykkyys	Hinta
Korroosionkesto	Epävarma kestävyys
Väsymiskestävyys	Muokattavuus
Kevyet siltarakenteet helppo kuljettaa ja asentaa	Palonkesto
Yksityiskohtaisen suunnittelun mahdollistaminen	Suunnitteluohjeiden puuttuminen
Materiaalien ekologisuus	Liitossuunnittelu
Sähkönjohtavuus	
Estetiikka ja muodon pysyvyys	
Pakkas- ja suolarasituksen kesto	

Komposiitit eivät johda sähköä. Siksi etuina merkitty sähkönjohtavuus tarkoittaa, että komposiittirakenteisia siltoja voidaan käyttää alueilla, jossa sähköiskun riski on suuri, kuten kevyen liikenteen sillat rautatieverkon yli.

Erityisesti korkeat lyhytaikaiskustannukset ja epävarmat pitkäaikaiskustannukset luovat ison riskin komposiittien käyttämiselle. Tällä hetkellä komposiittirakenteiset rakenteet ovat perinteisiin materiaaleihin verrattuna kalliimpia tuotantokustannuksiltaan. Komposiittien kustannuksista pitkällä aikavälillä on vähän tietoa, sillä merkittäviä projekteja on rakennettu vasta vähän aikaa komposiiteista ja ala on uusi. Kestävyyskin mainitaan haittana komposiittien vähäisen käytön ja epävarmojen tulosten takia.

Ajdukiewicz et al. (2009) ovat selvittäneet tutkimuksessaan kuitujen käytön hyötyjä betonirakenteessa verrattuna raudoitusteräkkeeseen. Kantavissa betonirakenteissa käytetään tavallisesti betonimassan sisällä raudoitusta, joka parantaa rakenteen kantokykyä. Betoni kestää hyvin puristuksen aiheuttamaa jännitystä, mutta halkeilee ja rikkoontuu jo suhteellisen pienestä vetojännityksestä. Tavallisesti rakenteet raudoitetaan harjateräksillä tai verkoilla, jolloin rakenteet suunnitellaan toimimaan hyvin yhdessä. Betoni ottaa vastaan puristuksen ja teräs ottaa vastaan vedon. Raudoituksen käyttö betonissa asettaa kuitenkin paljon raja-ehtoja, jolloin kevyiden rakenteiden suunnittelu ja toteutus voi olla perinteisin menetelmin hankalaa.

Kantavuuden lisäksi rakenteilta vaaditaan pitkäaikaiskestävyyttä ja esimerkiksi X0 luokan betonilta, jonka raudoituksen betonipeite on pienin, vaaditaan 50 vuoden käyttöiällä 20 mm betonipeitteen nimellisarvoa asuinrakennuksissa. Raudoituksella tulee olla tässä rasitusluokassa siis vähintään 20 mm betonipeitekerros ympärillään suojaamassa ympäristörasituksilta, kuten raudoitusten korroosiolta. Raudoituksen betonipeitevaatimus ei koske Ajdukiewicz et alin (2009) mukaan kuiduilla vahvistettua betonirakennetta, jolloin betonipeitekerrosvaatimusta ei ole. Käytetyillä kuiduilla on yleensä korkea korroosionkestävyys ja pieni massa, jolloin voidaan toteuttaa elementtejä, joiden kerrospaksuus on pieni. Keveyden lisäksi kuitujen käyttö mahdollistaa niiden sijoittamisen ennakoitujen jännitystilojen suuntaisesti (Ajdukiewicz et al. 2009).

Tämän kappaleen teoriaosuudessa käytetyn aineiston mukaan ilmeni, että vaikka kuitulujitteilla komposiiteilla saavutetaan hyvin kevyitä ja kestäviä rakenteita, tarvitaan jatkuvaa kehitystyötä, lisää tutkimusta komposiiteista ja komposiittimateriaalien ominaisuuksien laajempaa ymmärtämistä. Vähäiset toteutetut projektit, korkeammat rakennuskustannukset perinteisiin materiaaleihin verrattuna ja materiaalitiedon sekä suunnitteluohjeiden puuttuminen ovat tutkijoiden mukaan syitä, joiden takia komposiittien käyttöä ei vielä voida täysin hyväksyä perinteisten rakennusmateriaalien rinnalle käytettäväksi materiaaleiksi.

2.2.2 3D-tulostettu komposiittirakenteinen silta

Komposiittien täysi hyöty saavutetaan, kun matriisissa käytetään kuitulujitteita vahvistamaan materiaalia. Tällä hetkellä 3D-tulostetuissa materiaaleissa ei käytetä merkittävästi lujittavia kuiturakenteita, jolloin komposiittien käytön täyttä kapasiteettia ei ole vielä saavutettu 3D-tulostetuissa rakenteissa.

Kaikkein lujimpiin 3D-tulostettuihin siltoihin päästäisiin, kun komposiittimateriaaliin sekoitettaisiin kuituja joko mekaanisesti tai itse massaansa. Tulevaisuudessa voitaisiin tutkia, kuinka kevyeen ja vahvaan rakenteeseen voidaan päästä käyttämällä kuiduilla vahvistettuja rakenteita. Tällöin voitaisiin tulostaa matriisiin suunnattuja kuituja syntyvien jännitystilojen mukaisesti.

3D-tulostamisen hyödyt sillanrakentamisessa ovat samat kuin komposiittirakenteisten siltojen. Yhtä lailla 3D-tulostamalla voidaan luoda aikaan kevyitä ja rakenteita, jotka ovat nopeita ja helppoja asentaa paikan päällä tai jopa 3D-tulostaa silta suoraan paikalleen. Taulukon 3 ominaisuudet pätevät siis myös 3D-tulostettuun siltaan. 3D-tulostetun rakenteen etuna tulee sillanrakentamisessa taulukkoon 4 kootut ominaisuudet.

Taulukko 4. 3D-tulostamisen hyödyt komposiittirakenteisen sillan rakentamisessa.

<i>Ominaisuus</i>	<i>Hyöty</i>	<i>Tapa</i>
Lujuus	Lujitekuiduilla aikaan vahvoja rakenteita	Lujitekuitujen 3D-tulostaminen syntyvien jännitystilojen suuntaisesti
Optimointi	Kevyet rakenteet, parametrisen suunnittelu	Menetelmän hyötyjen tiedostaminen ja käyttäminen jo suunnitteluvaiheessa
Tuotannon tehostus	Virheiden vähentyminen, korkea esivalmistusaste, nopea valmistus	Pitkälle viety automaatio vähentää virheitä, mahdollistaa sarjatuotannon ja vähentää rakennusaikaa
Muotoilun vapaus	Uudenlaisten rakenteiden suunnittelu	Kaarevien, kevyiden ja esimerkiksi kennolevyrakenteiden valmistus

Taulukko 4 on koottu lähdeaineiston, pääasiassa Chekurov et al. (2017), Potyrala (2011) ja Dudek (2013) avulla soveltaen tämän tutkimuksen tavoitteisiin. Tämän tutkimuksen tekovaiheessa ainoa 3D-tulostettu käyttöön otettu silta maailmassa oli IAAC:in suunnittelema silta Barcelonassa, josta kerrotaan kappaleessa 4.2.3. Aihe on siis uusi eikä komposiittirakenteisten kappaleiden 3D-tulostamisen hyödyistä ole olemassa vielä tutkimuksia.

3D-tulostamalla voitaisiin luoda kuiturakenteita, jotka suoraan tulostettaisiin haluttujen jännitystilojen suuntaisesti ottamaan vastaan rasituksia. Lujitekuitua voitaisiin tulostaa joko erillisellä suuttimella jatkuvina kuiturakenteina tai katkottuina massaan sekoitettuna kuituina, jolloin voitaisiin tulostaa yhdellä suuttimella.

3D-tulostamalla voidaan viedä rakenteen optimointi hyvin pitkälle suunnitteluohjelmien avulla. Luvun 3 prosessin mukaan voitaisiin tehostetun suunnittelutyön mukaisia rakenteita 3D-tulostaa kevyinä. Tämä vaatii kuitenkin suunnittelun osaamista ja soveltamista. Tuotantomenetelmän mahdollisuudet ja vähäiset rajoitteet pitää tiedostaa jo suunnitteluvaiheessa.

Siltojen valmistusta sarjatuotantona olisi myös mahdollista uuden menetelmän myötä. Suunniteltua mallia voidaan skaalata maastogeometrian mukaiseksi, jolloin kertaalleen suunniteltua 3D-mallia voidaan tulostaa minimaalisella suunnittelutyöllä eri kokoisena. Tällöin suunnittelun ja toteutuksen virheiden määrää saadaan pienennettyä, kun tuotanto on pitkälle vietyä automaatiota.

3D-tulostettujen siltojen tuotanto riippuu käytettävän materiaalin soveltumisesta silta-alan vaatimuksiin rasitusten, pitkäaikaiskestävyyksien ja jäykkyyden kannalta sekä 3D-tulostustekniikasta. Tulostettavan kappaleen koko riippuu 3D-tulostimen tulostustilavuudesta. Tällä hetkellä Suomen isoimmat komposiittirakenteiset 3D-tulostimet kykenevät tulostamaan noin kuutiometrin kokoista kappaletta. Suurempia 3D-tulostimia ja tulostusrobotteja (alaluku 4.1.2), joilla voidaan tulostaa kokonaisia elementtejä, on valmistettu Suomessa. Fimatecin RoboCatt 3D-tulostaa kokonaisia seinäelementtejä (alaluku 4.1.1). Arvioitaessa 3D-tulostustekniikan soveltumisesta siltojen tuotantoon Suomessa, voidaan alustavasti hyvin karkeasti olettaa, että kevyen liikenteen sillat, joissa päärakennusmateriaalina on puu ja joissa jännemitta on alle 5 m voitaisiin 3D-tulostaa lähitulevaisuudessa.

Siltojen lukumäärää selvitettiin hakemalla kuntien ja liikenneviraston hallinnoimia siltoja siltarekisteristä. Haussa selvitettiin sekä vuoden aikana rakennettuja siltoja, että tähän asti rakennettujen puurunkoisten siltojen lukumäärää yhteensä. Tarkasteluvuodeksi otettiin vuosi 2015. Siltarekisteristä haettiin vastaus alla oleviin kysymyksiin:

1. Kuinka monta kevyen liikenteen siltaa rakennettiin vuonna 2015?

- 19 kpl

2. Kuinka monessa näistä oli päärakennusmateriaalina puu?

- 1 kpl

3. Kuinka monessa näistä oli jännemitta maksimissaan 5 m?

- 0 kpl

1. Kuinka monta kevyen liikenteen siltaa on rakennettu yhteensä?

- 1459 kpl

2. Kuinka monessa näistä oli päärakennusmateriaalina puu?

- 350 kpl

3. Kuinka monessa näistä oli jännemitta maksimissaan 5 m?

- 56 kpl

Vastauksista käy ilmi, että vuonna 2015 ei rakennettu yhtään kevyen liikenteen siltaa puusta, jossa jännemitta olisi alle 5 m ja joka olisi liikenneviraston tai kuntien hallinnoima. Yhteensä tällaisia siltoja on rakennettu vain 56 kpl. Näiden tulosten pohjalta voidaan todeta, että 3D-tulostustekniikan sovellutukset eivät välttämättä ole kuntien tai liikenneviraston hallinnoimien uusien siltojen rakentamisessa. Suomessa on siltoja kuitenkin monilla puistoalueilla, yksityisteillä, pihoilla ja luontopoluilla, jotka eivät välttämättä ole liikenneviraston tai kuntien hallinnoimia siltoja tai niiden jännemitta on alle 2 m, jolloin ne luokitellaan rummuiksi eikä silloiksi. Näiden siltojen lukumäärää ei kirjata siltarekisteriin. 3D-tulostamalla voitaisiin rakentaa persoonallisia ja yksityiskohtaisia siltoja näihin kohteisiin.

Suunnittelijat suunnittelevat helpponäköisiä rakenteita, joiden tuotanto on mahdollista. Tästä syystä rakennuksissa ja silloissa rakenteiden geometria on neliöitä, suorakulmioita ja ympyröitä. 3D-tulostettuja rakenteita ei kuitenkaan tarvitse eikä pidä suunnitella samanlaisiksi kuin perinteisillä menetelmillä valmistettuja kappaleita. Tästä seuraa uusia haasteita suunnittelijan näkökulmasta; miten päästä pois helpoista geometrioista kohti myös visuaalisesti hienojen ja toiminnallisesti merkittävien siltamallien suunnittelua? Tähän kysymykseen on myös tämän tutkimuksen aikana pyritty vastaamaan.

2.3 Esimerkkejä rakennetuista komposiittisilloista

Tutkimukseen on otettu mukaan kolme komposiittirakenteista siltaa, jotka ovat kaikki kevyen liikenteen siltoja. Lisää tietoa ja lista komposiittirakenteisista silloista löytyy Potyralan (2011) julkaisussa.

2.3.1 Ekin silta

Ekin silta (kuva 3) on jänneväliiltään 15 m ja leveydeltään 2,5 m. Sillan kaarevuus on 0,5 m. Se painaa 3200 kg ja taipuman rajoittama kantavuus on 25 000 kg. Murtokuorma on 70 000 kg. Silta on valmistettu lujitemuovikomposiitista alipaineinjektiolla. Matriisin lujitteena on käytetty suunnattuja lasikuitukudoksia. Materiaalin muita yhdisteitä ovat polyesteriharsti ja ydinaineet. Käyttöäksi ilmoitetaan 50-100 vuotta.



Kuva 3. Ekin silta. Lähde: <http://www.ekinmuovi.fi/fi/TUOTTEET/SILTA.html>

Muovin käyttö teräksen tai puun sijaan antaa muutamia materiaalille ominaisia hyötyjä. Muovi ei ruostu teräksen tavoin eikä lahoa puun tavoin eikä sitä tarvitse huoltaa. Sillan runko ja kaiteet eivät tarvitse huoltoa. Siltaa voidaan yrityksen mukaan valmistaa 100 m saakka ja leveyttä voidaan muuttaa 1,5 m ja 5 m välillä. Sillan kantavuutta voidaan muunnella kuitulujitteen määrää ja laatua muuttamalla. Sillan runko ja kaiteet voidaan muotoilla vapaasti ja eri materiaaleja käyttäen. Sillan kevyen painon ansiosta voidaan silta valmistaa tehtaalla valmiiksi tuotteeksi, kuljettaa käyttöpaikalle ja asentaa nopeasti.

Yrityksen edustajan kanssa käytiin 15.9.2017 puhelinhaastattelu, jossa selvitettiin lujitemuovisillan mahdollisuuksia ja etuja perinteisiin materiaaleihin nähden. Ekin muovin tuotekehitysjohdajan ja hallituksen puheenjohtajan, **Erkki Lapin** mukaan komposiittirakenteisen sillan etuina on työmaan perustamistarpeen poistaminen, mikä eroaa vastaavan sillan teräksestä tai betonista rakennettuun. Betonisiltaa rakennettaessa tarvitaan muotinrakentamista, betonivalua ja sen jälkihoitoa, muotinpurkua, työmaalle sähkö- ja vesisyöttöä. Terässilta pitää kasata yhteen työmaalla ja sitä varten pitää perustaa työmaa. Komposiittirakenne voidaan sen keveyden ansiosta tuoda kokonaisena paikalleen alusrakenteiden varaan yhtenä kappaleena. Kevyen painon ansiosta tukirakenteet voidaan usein toteuttaa kevyempinä. Silta-ajan nykyiseen liikenteeseen ei näin ollen vaikuta kuin sillan kuljetus- ja asennustilanne. Näistä syistä komposiittisillan kokonaiskustannukset voivat tulla halvemmaksi, vaikka siltarakenteen kustannukset ovat korkeammat. Nykyinen prototyyppisilta on myyty Kittilään ja yrityksen tarkoitus on kehittää siltamallia sarjatuotantoon.

2.3.2 Oschatzin kevyen liikenteen silta

Saksan Oschatzissa sijaitseva Oschatzin kevyen liikenteen silta (kuva 4) on koottu kymmenestä 90 cm pituisesta ja vain 3 cm paksuisista poikkileikkaukseltaan U-muotoisista moduuleista, jotka on vahvistettu kuiduilla. Moduulit on koottu yhteen kuudella teräspalkilla ilman esijännitystä. Lopullisen siltarakenteen massa on 5 t, joka on vain viidesosan vastaavanlaiseen teräsbetonisiltaan verrattuna. Sillalla on osavarmuutta saksalaisiin suunnitteluohjeisiin verrattuna yli kolminkertaisesti. (Ajdukiewicz et al. 2009)



Kuva 4. *Oschatzin kevyen liikenteen silta. Lähde: <https://structurae.net/structures/oschatz-footbridge>*

Kemptoniin rakennettiin myöhemmin toinen 15,95 metrinen kuituvahvistettu silta, joka Ochatzin tavoin oli poikkileikkaukseltaan U:n muotoinen. Rottachin kevyen liikenteen silta koostui 18:sta moduulista, kukin pituudeltaan 93 cm. Tämän sillan paino oli vain 12,5 tonnia. (Ajdukiewicz et al.2009).

2.3.3 ApATeCH:n kevyen liikenteen silta

Venäläisen yrityksen ApATeChin yhteistyössä Lightweight Structures B.V kanssa suunnittelema ja toteuttama kevyen liikenteen silta (kuvat 5 ja 6) oli ensimmäinen vakuumi infuusio- menetelmällä rakennettu komposiittirakenteinen silta Venäjällä. Silta sijaitsee Vernadskogon metroaseman vieressä ”50 years of October”- puiston vieressä. Sillan hyödyiksi luetellaan saman muotin käyttömahdollisuutta eri kokoisille silloille, pieni oma paino ja siitä johtuva kuljetuksen helppous, korroosionkesto ja pienet huoltokustannukset.



Kuva 5. ApATeCHin kaarisilta. Lähde: Potyrala (2011)

Silta koostuu keskikaaresta ja kahdesta palkista. Sillan pituus on 22,6 m ja leveys 2,8 m. Sillan oma paino on noin 4,5 t. Kaikki osat, metallisia saranoita ja kaidekiinnityksiä lukuun ottamatta, ovat komposiittia. Silta asennettiin paikalleen kesäkuun 18. päivä vuonna 2008. Projekti johti jännemitaltaan 15-30 m ja käyttöikältään 100 v kevyen liikenteen siltojen tuotantolinjan syntymiseen. Uusi menetelmä vähensi tuotannon välivaiheita, kokoamisen tarvetta ja pienensi silanrakentamisen kokonaiskustannuksia. (Potyrala 2011)



Kuva 6. ApATeCH sillan osat ja asennus. Lähde: Potyrala (2011)

3. 3D-TULOSTAMINEN

Luvussa 3 kerrotaan 3D-tulostamisen tapahtumaketjusta, tutkimuksessa käytetystä FDM-menetelmästä sekä menetelmässä tyypillisesti käytetyistä materiaaleista. Luvussa käydään läpi myös 3D-tulostamiseen liittyviä tulostusasetuksia. Alaluvussa 3.1 esitetään tapahtumaketjua luonnoksesta 3D-tulostettuun lopputuotteeseen. Alaluvussa 3.2 esitetään FDM-menetelmä sekä kerrotaan menetelmälle tyypillisistä ominaisuuksista.

3.1 3D-tulostusprosessi

3D-tulostaminen noudattaa prosessia, jossa ideasta kehittyy 3D-mallin kautta 3D-tulostettu lopputuote. Suunnitteluprosessi on monivaiheinen ja edellyttää suunnittelun hallitsemista sekä 3D-tulostusosaamista.

3.1.1 3D-malli

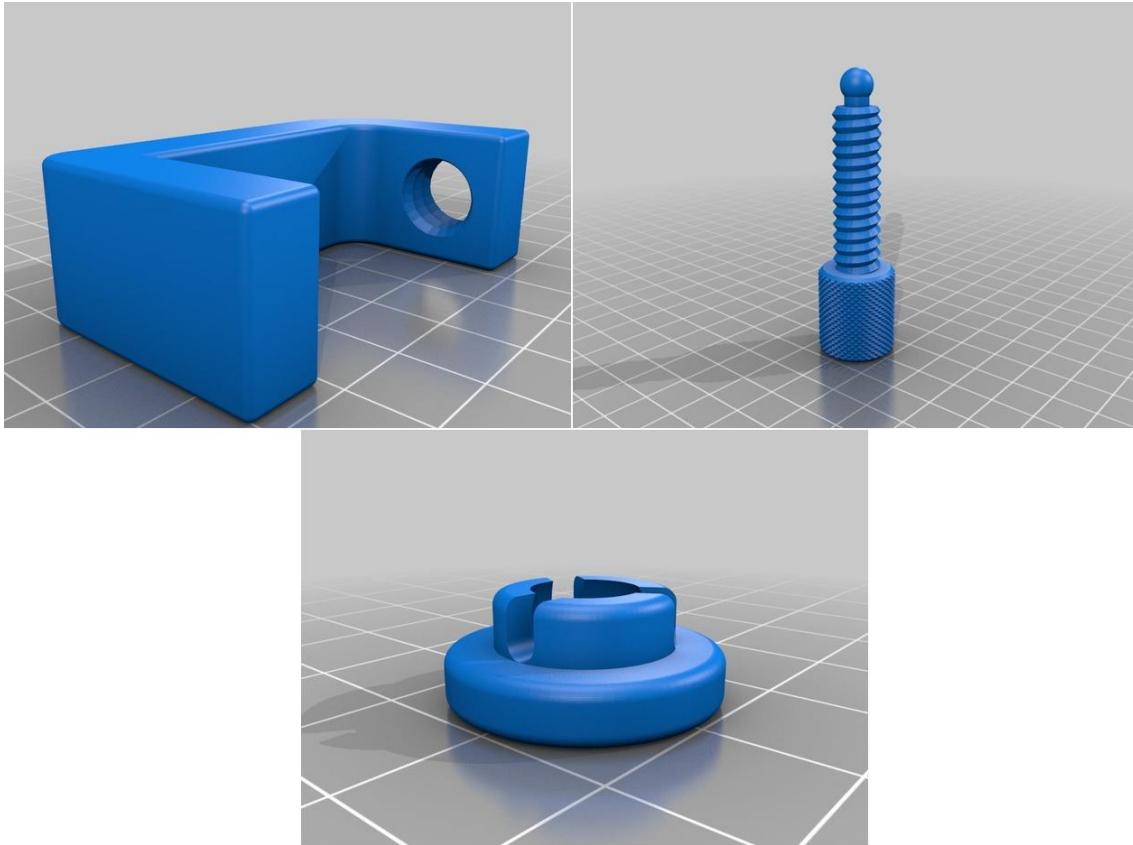
Projektin rakennesuunnittelu alkaa luonnoksen piirtämisellä. Luonnos voi olla paperille vapaalla kädellä piirretty suunnitelma, 2- tai 3D-malli tai näiden kolmen yhdistelmä. 3D-mallintamalla rakennetaan malli kolmiulotteisesti piirtäen kappaleet, osat ja kokoonpanot oikeiksi. Piirrettäville osille annetaan fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet, jotka valmiilla tuotteella on todellisuudessa. 3D-malliin voi kirjoittaa tietoa materiaaleista, koordinaateista ja tehdä rakennneosien ryhmittelyä. 3D-malli voidaan suunnitella 3D Cad ohjelmalla. (Tuhola & Viitanen 2008)

3D-mallin luominen alkaa Tuholan ja Viitasen (2008) mukaan mallin lähtötietojen keräämisellä, jotka projektin suunnittelija saa omasta ideastaan, valmiista luonnoksesta, tuotteesta tai toimeksiannosta. Lähtötietojen kartoittamisen aloitetaan mallin luomisen esivalmistelut, jossa järjestelmään syötetään asiakkaalta saadut pohjatiedot ja tehdään tarvittavat määrittelyt. Viimeisessä vaiheessa suunnittelija aloittaa mallinnusprosessin luomalla toimeksiannon pohjalta karkean luonnoksen eli skitsin. Tämän jälkeen sketsistä luodaan 3D-malli ja näitä kahta vaiheita toistetaan, kunnes tuote on kokonaisuudessaan mallinnettu eli siitä on tehty osamallit. Osamallien avulla tehdään kokoonpano ja tarvittavat 2D-piirustukset osaluetteloiheen ja tuotetietoiheen.

Toinen yleinen tapa 3D-mallin tekemiseen on kappaleen tai osan skannaaminen laserkeilaamalla (Horvath 2014), jolloin mallin sisältämä tieto kerätään olemassa olevasta datasta eikä luoda tyhjästä kuten edellä olevassa tapauksessa. Laserkeilaus on rakennusosalalla vakiintunut käytäntö pistepilviaineiston keruussa. Laserkeilaamalla kohde skannataan laserin avulla. Infra-alalla käytetään laserkeilausta ilmasta käsin, liikkuvasta ajoneuvosta ja paikallaan seisovasta laserkeilaimesta (Pekkala 2015), jolloin tietoa maastosta voidaan kerätä noin 10 cm tarkkuudella. Maalaserkeilauksella päästään tarkimpaan mittaustarkkuuteen, noin 2-5 cm. Toisaalta menetelmä ei sovellu laajojen alueiden mittaamiseen ja se on melko hidas. Lentolaserkeilauksella saadaan skannattua nopeasti maasto tapauksiin, joissa ei vaadita suurta mittaustarkkuutta.

Laserkeilauksen tuotoksena syntyy pistepilviaineisto, joka muodostuu skannatun aineiston yksittäisistä pisteistä. Kerätty pistepilviaineisto yhdistetään malliksi joko käsin tai tietokoneohjelman avulla. Pistepilven laadukkuuteen vaikuttaa 1) pistepilven hajonta ja intensiteetti, 2) pistepilven tiheys ja 3) pistepilvien yhdistämisen laatu (Pekkala 2015).

Joissain tapauksissa voi käyttää olemassa olevia malleja sen sijaan, että piirtää mallin itse. Valmiita 3D-tulostamiseen tarkoitettuja malleja voi ladata avoimeen lähdekoodiin perustuvien yhteisöjen Internet-sivustoilta kuten Thingiverse, MyMiniFactory ja SketchUp 3Dwarehouse. Valmiilla malleilla pääsee hyvin alkuun 3D-tulostamisessa, sillä ne ovat valmiiksi tulostettavassa STL-tiedostomuodossa. STL on 3D-tulostimien ymmärtämä tiedostomuoto, josta kerrotaan seuraavassa kappaleessa. Useimpiin avoimeen lähdekoodiin perustuvissa palveluissa käyttäjä voi ladata valmiita malleja itselleen ja myös itse suunnittelemaa malleja muille käyttäjille. Tätä kautta mallit ja niistä koostuvat koodit kehittyvät ilmaiseksi kaikille käyttäjille. Tähän tutkimukseen perehtyminen alkoi G-puristin-mallin STL-tiedoston (kuva 7) lataamisella Thingiverse-sivulta. Malli koostui kolmesta erikseen tulostettavasta osasta.



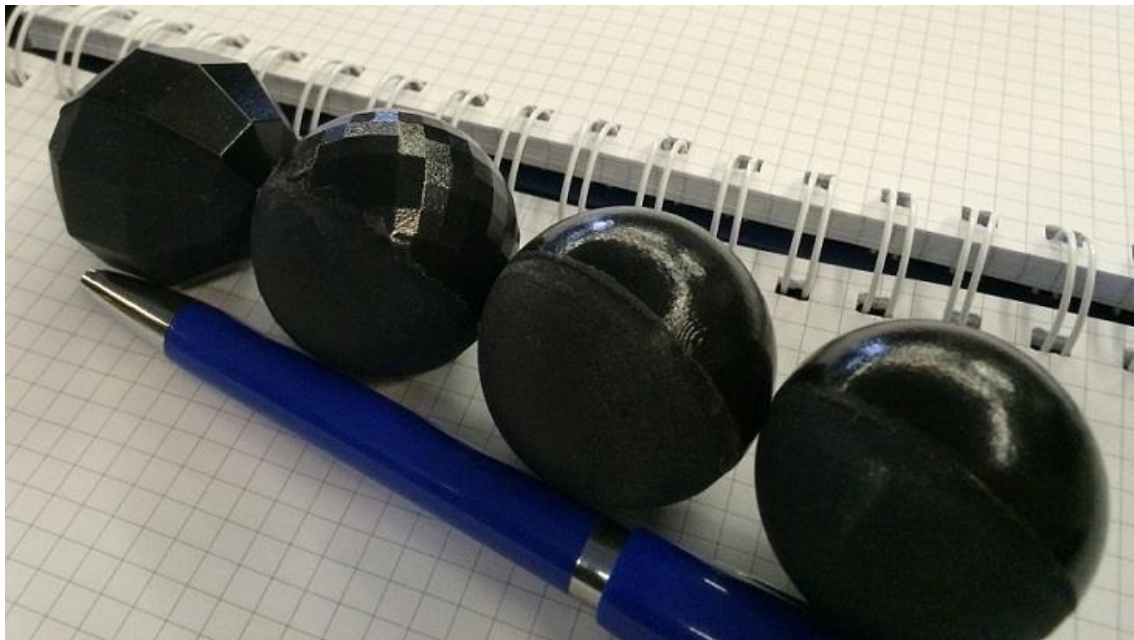
Kuva 7. Thingiverse.com sivustolta ladattu STL-tiedosto G-puristimen osista.

3.1.2 STL-tiedostomuotoon muuttaminen

Mallinnusohjelmilla voidaan luoda erilaisia malleja eri käyttötarkoituksiin. 3D-malleista voidaan Tuholan & Viitasen (2008) mukaan erotella rautalankamalli, pintamalli ja tilavuusmalli. Näissä kaikissa 3D-mallia tarkastellaan eri tavoin. Tämänhetkiset 3D-tulostimet ymmärtävät pääasiassa STL-tiedostomuotoa (StereoLithography tai Surface Tessellation Language) (Horvath 2014), jolloin mallinnettu kappale pitää tallentaa mallinnusohjelman avulla STL-tiedostomuotoon. STL-tiedostomuodossa kappale pelkistetään esittämällä se kolmioina, jotka peittävät kauttaaltaan mallin pinnan (Horvath 2014).

STL-mallissa kappaleen päälle luodaan kolmioverkko, joka on approksimaatio oikeasta mallista (Szilvasi-Nagy & Matyasi 2003). Tällöin kolmiot oikaisevat eivätkä seuraa tarkasti pinnan kaarevuutta. Approksimaation tarkkuus riippuu kolmioiden lukumäärästä; mitä enemmän kolmioita on käytetty approksimaatioon, sitä tarkempi kuvaus mallista saadaan. Kolmioiden jokaisen kärjen paikka määritetään kolmella koordinaatilla. Tämän lisäksi kolmion pintanormaalien paikka esitetään myös kolmella numerolla. STL-tiedosto ei sisällä yksiköjä vaan koordinaatit esitetään luettavassa muodossa olevina lukuarvoina.

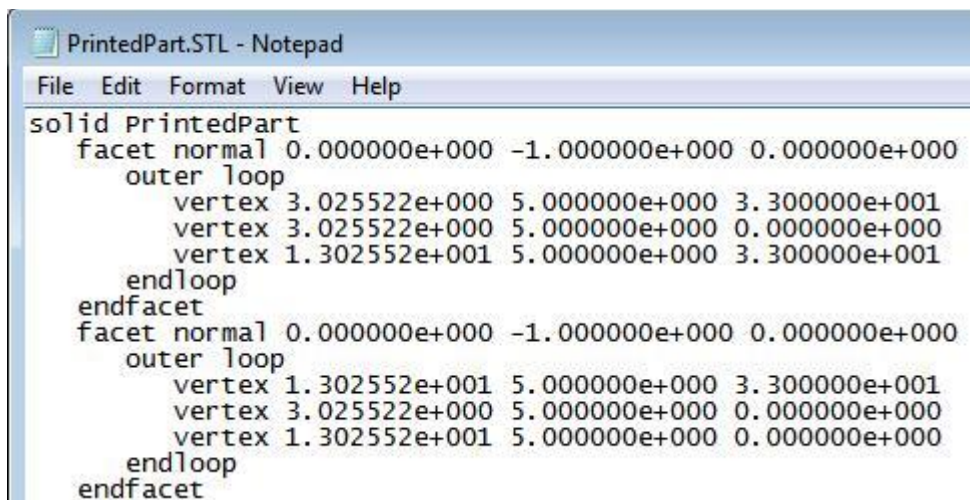
Yhteensä STL-tiedoston kolmio esitetään 12 numeron avulla. Kuvassa 8 on esitetty saman kappaleen tulostusta eri STL-asetuksilla. Sama pallonmuotoinen kappale on tulostettu käyttäen eri tarkkuusasetuksia, jossa oikeanpuoleisin kappale on tulostettu tarkimmin ja vasenpuolimmais kappale suurimmalla approksimaatiolla.



Kuva 8. STL-asetusten vaikutus tulostustarkkuuteen. Lähde: <http://aipworks.fi/3d-tulostus/tieto/stl-formaatti/>

Pinnoilla näkyvät neliöt muodostuvat kahdesta vierekkäin olevasta kolmiosta. Huomattavin ero STL-asetuksissa tulee vastaan kappaleen kaarevissa pinnoissa. Toisaalta tarkempi STL-malli sisältää enemmän dataa ja tiedostokoko on suurempi. STL-asetukset saadaan asetettua ohjelmien omista asetuksista.

Aikaisemmassa kappaleessa kerrottiin, että malli muunnetaan STL-tiedostomuotoon, jolloin sen pintamalli kolmioidaan. Kolmioinnissa kappale esitetään kauttaaltaan kolmioina, joista jokaisen kärjellä ja pinnanormalilla on koordinaatti. Jotta 3D-tulostin saa tulostettua tuotteen, koordinaatit pitää antaa luettavassa muodossa. STL-tiedoston sisältämä teksti esitetään joko ASCII-muodossa tai binäärimuodossa. ASCII (akronyymi sanoista American Standard Code for Information Interchange) on luettavissa olevia kuvan 9 mukaisia lukuarvoja. Binäärijärjestelmässä luvut esitetään käyttäen kahta merkkiä; tyypillisesti 0 ja 1.



```
PrintedPart.STL - Notepad
File Edit Format View Help
solid PrintedPart
  facet normal 0.000000e+000 -1.000000e+000 0.000000e+000
    outer loop
      vertex 3.025522e+000 5.000000e+000 3.300000e+001
      vertex 3.025522e+000 5.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 1.302552e+001 5.000000e+000 3.300000e+001
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+000 -1.000000e+000 0.000000e+000
    outer loop
      vertex 1.302552e+001 5.000000e+000 3.300000e+001
      vertex 3.025522e+000 5.000000e+000 0.000000e+000
      vertex 1.302552e+001 5.000000e+000 0.000000e+000
    endloop
  endfacet
```

Kuva 9. ASCII STL-tiedosto avattuna Notepadiin. Lähde: <http://aipworks.fi/3d-tulostus/tieto/stl-formaatti/>

3.1.3 Mallin viipalointi

Aikaisemmassa kappaleessa käsiteltiin 3D-mallin luomista mallinnusohjelmalla, skannaamalla tai valmiin mallin käyttämisellä. Seuraavaksi käsiteltiin luodun mallin muuttamisesta 3D-tulostimien ymmärtämään STL-tiedostomuotoon. Seuraava vaihe 3D-tulostusprosessissa on STL-tiedoston jakaminen tulostettaviin kerroksiin ja tulostusprosessin asetusten asettaminen eli G-koodin luominen. Tämä tapahtuu STL-tiedoston viipaloinnissa (englanniksi slicing). Viipaloinnissa STL-malli jaetaan kaksiulotteisiksi kerroksiksi, joita tulostin tulee tulostamaan kerros kerrokselta, kunnes koko kappale on tulostettu. Yhden tulostettavan kerroksen paksuus on tyypillisesti 0,15-0,4 mm. Viipaloinnissa voidaan asettaa tulostustapahtuman asetukset ja asetukset käytettävälle materiaalille. Viipalointiasetuksissa voidaan kerrospaksuuden lisäksi vaikuttaa materiaalityttöasetuksiin kuten kuviointiin ja täyttöprosenttiin, tulostusnopeuteen ja tukimateriaaliin käyttöasetuksiin. (Horvath 2014)

Onnistuneen lopputuotteen laatuun vaikuttaa viipaloinnissa asetetut asetukset, ei niinkään 3D-malli. Objektin viipalointi pitää Horvathin mukaan tehdä avoimeen lähdekoodiin perustuvassa ohjelmassa. Eräs tällainen ohjelma on Slic3r (Saatavissa: www.slic3r.org). Viipalointi on yleensä osa isännöintiohjelmaa, jolla on yhteys 3D-tulostimeen. Isännöintiohjelmassa voidaan muuttaa kappaleen sijaintia tulostusalustalla ja kääntää sitä. Isännöintiohjelma myös näyttää tulostimen edistymistä ja sillä voidaan tarkastella tulostukseen liittyviä asioita ja manuaalisesti vaikuttaa 3D-tulostimen asetuksiin, kuten tulostussuuttimen ja tulostusalustan lämpötilaan, 3D-tulostimen tuulettimeen ja suuttimen koordinaatteihin. Internetistä saatavia Ilmaishohjelmia ovat muun muassa Repetier Host (www.repetier.com) ja Mattercontrol (www.mattercontrol.com).

3.1.4 3D-tulostus

Viipaloinnin jälkeen malli on valmis tulostettavaksi. Viipaloinnin seurauksena malli esitetään G-koodina eli listana komentoja, joita tulostin ymmärtää. G-koodi sanelee tulostimelle käytettävän yksikkömuodon, joka tyypillisesti on millimetri, koordinaatistotyyppin absoluuttisen ja relatiivisen välillä, määrittää tulostimen sijainnin x-, y- ja z-tasossa, sekä samalla filamentin pursotuspituuden, joka pitää olla pursotettu käskyn loppuessa (Horvath 2014). Varsinaisen tulostuksen alettua, käyttäjän ei tarvitse tehdä mitään, jos mikään ei mene pieleen. Tulostusta on kuitenkin syytä valvoa. Tätä tutkimusta tehdessä eräs sillan pienoismalleista irtosi alustasta tulostettaessa ja tulostus piti lopettaa kolmen tunnin jälkeen, kun tulostusta oli jäljellä enää puoli tuntia. Toisella kerralla aloitettaessa tulostamista materiaali jäi kiinni tulostuspäätteeseen. Jälleen kerran tulostus piti lopettaa ja alusta puhdistaa. Pienoismallin tulostuksessa ensimmäinen versio irtosi alustasta noin 5 mm tulostamisen jälkeen, jolloin tulostus piti lopettaa ja aloittaa uudestaan uusilla asetuksilla. Virheitä lukuun ottamatta käyttäjää ei tarvita tulostustilanteessa 3D-tulostin tekee viipaloinnissa määritetyt G-koodin mukaiset käskyt alusta loppuun, jolloin käyttäjä voi seurata itse tulostusprosessia.

Tuotteen 3D-tulostusprosessi alkaa aina mallin luomisella. 3D-malli saadaan skannaamalla tai avointa lähdekoodia käyttävistä palvelimista. Tämän jälkeen 3D-malli muunnetaan STL-tiedostomuotoon ja viipaloidaan valmiiksi tulostimelle. 3D-tulostin tulostaa viipaloidun mallin kerros kerrokselta ja lopputuotteena saadaan mallin mukainen kappale tulostettuna. 3D-tulostusprosessi on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. 3D-tulostaminen mallista lopputuotteeksi.

Onnistuneen tulosteen luomisessa on monta vaihetta, joiden onnistumiseen voidaan vaikuttaa huolellisella suunnittelulla alusta alkaen. Tulostettavan kappaleen pitää olla käytettävän materiaalin ja 3D-tulostimen vapausasteiden mukainen. Käytännössä käyttäjä oppii tulostussuunnittelun yrityksen ja erehdyksen kautta ja vain itse kokeilemalla. Onnistuneen tulostuksen tekeminen, voi vaatia useita tulostuskertoja eri tulostusasetuksilla ennen kuin saadaan lopputulokseksi haluttu tuote (Horvath 2014). Suunnittelijan tulisi aloitettaessa suunnittelua miettiä kappaleen tulostettavuutta ja tulostussuuntaa. Mitä on mahdollista 3D-tulostaa, miten se kannattaa suunnitella, millä asetuksilla saan parhaimman laadun ja onko tulostukseen tarvittava aika realistinen? Näiden kysymysten miettiminen alkuvaiheessa voi helpottaa suunnittelua ja tulostusta merkittävästi.

3.2 Materiaalia lisäävä pursotusmenetelmä (FDM)

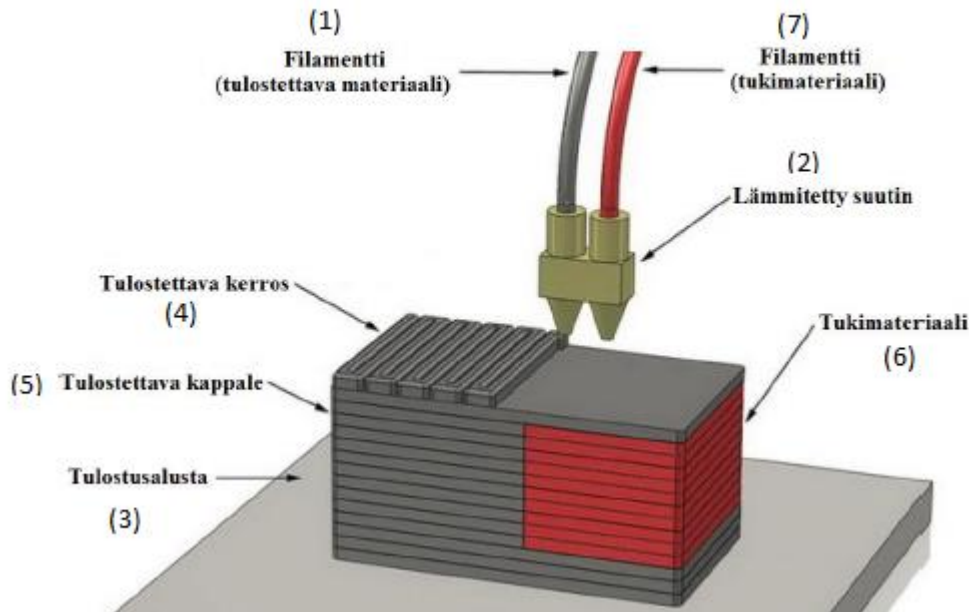
FDM tulee englanninkielisistä sanoista fused deposition modeling, jossa tulostus tapahtuu materiaalia pursottamalla. FDM-menetelmä on eräs materiaalia lisäävistä valmistusmenetelmistä, joka perustuu materiaalin sulattamiseen ja lisäämiseen suuttimen kautta tulostusalustalle kerros kerrokselta, kunnes kappale on kokonaisuudessaan tulostettu (Vaezi et al 2011).

Menetelmää käytetään pääosin muovikomposiittien valmistuksessa. FDM-tekniikalla valmistetaan prototyypppejä suunnitteluun, analysoimiseen ja toiminnalliseen testaukseen. FDM:llä voidaan myös valmistaa suoraan lopputuotteita kuten pienoismalleja, valumalleja, työkaluja ja lopputuotteita (Dudek 2013).

3.2.1 FDM-menetelmän kuvaus

FDM-menetelmässä materiaalia syötetään lämmittävän elementin kautta, joka aiheuttaa materiaalin täysin tai osittain sulamisen. Tätä prosessia on esitetty kuvassa 11, joka perustuu Novakova-Marcincinova et al.:in (2012) julkaisuun. Suutinta (2) lämmitetään vastusten avulla lämpötilaan, jossa filamentti (1) on juuri sulamispisteensä yläpuolella ja materiaali virtaa hyvin suuttimessa. Sulanutta filamenttia syötetään lämmitettävän suuttimen kautta tulostusalustalle, jolloin filamentti jähmettyy välittömästi laskeuduttuaan tulostusalustalle (3). Tulostettavan kerroksen (4) valmistuttua, syötetään materiaalia edellä kuvatulla tavalla jo kovettuneen kerroksen päälle, jolloin uusi materiaali sulautuu kiinni pursotettuun materiaaliin luoden kappaleen kerros kerrokselta. Suutin liikkuu x-y-tasossa ja pursottaa materiaalia kyseisen kerroksen geometrian mukaan, josta tieto on kirjoitettu G-koodiin. Kerroksen valmistuttua riippuen tulostuskoneesta tulostuspää liikkuu ylöspäin tai tulostusalusta laskeutuu alaspäin pystysuuntaisessa z-tasossa kerrospaksuuden verran. Tämän jälkeen suutin aloittaa uuden kerroksen tulostamisen edellisen päälle. Suutin jatkaa, kunnes kaikki kerrokset on tulostettu ja lopputuotteena on CAD-mallin mukainen tulostettu kappale (5). Tulostusaika on minuuteista useaan päivään riippuen kappaleen koosta, muodoista ja tulostusasetuksista (Dudek 2013).

FDM-menetelmässä ensimmäinen kerros tulostetaan suoraan tulostusalustan päälle ja seuraavat kerrokset ensimmäisen päälle. Pursotettava materiaali kiinnittyy aina joko alustaan tai materiaalin päälle. Joissain tapauksissa halutaan tulostaa materiaalia tyhjän päälle, jolloin tarvitaan joko mallin tulostamista eri osissa tai tukirakenteita (Dudek 2013; Horvath 2014). FDM-menetelmässä ei voida tulostaa suoraan yli 45 asteen kulmassa poispäin tulostettavalta kerrokselta, sillä pursotettava materiaali ei tartu edelliseen kerrokseen kunnolla (Dudek 2013), vaan apuna pitää käyttää tukimateriaalia (6). Tukirakenteiden tulostamista varten tulostusjärjestelmässä on yleensä toinen suutin (7), joka tulostaa vain tukimateriaalia. Tukimateriaali rikotaan tai liuotetaan pois tulostuksen jälkeen (Dudek 2013). Tukimateriaalin käyttö voidaan kuitenkin Horvathin (2014) mukaan usein poistaa huolellisella tulostussuunnittelulla. Tällöin tulostettava kappale tulostetaan useammassa osassa, jolloin tukirakenteiden käyttö on tarpeetonta ja kappaleet yhdistetään tulostuksen jälkeen yhteen esimerkiksi liimaamalla. Toinen tapa on vaikuttaa kappaleen asetteluun tulostusalustalle viipaloinnin yhteydessä.



Kuva 11. FDM-menetelmän toimintaperiaate. Lähde: Novakova-Marcincinova et al. 2012

FDM-menetelmän kulut syntyvät laitteistosta, materiaalista, tukimateriaalista ja mahdollisesta jälkityöstöstä. FDM-menetelmä on muihin tulostusmenetelmiin verrattuna halvin ja siitä on kehitetty monia pöytätulostinversioita oppilaitoksille ja yrityksille sekä kotikäyttöön (Novakova-Marcincinova 2012; Horvath 2014). Nämä soveltuvat hyvin pienien kappaleiden mallintamiseen ja tulostamiseen. Tyypillisesti tulostettavien kappaleiden suurin koko on tällä menetelmällä tulostettuna ollut 20 x 20 x 20 cm, mutta isompiakin 3D-tulostimia on olemassa ja niitä kehitetään jatkuvasti.

Tällä hetkellä suuremmat 3D-tulostimet tulostavat pääosin muovin eri yhdisteitä FDM-menetelmää käyttäen. FIT Groupin rakentama 3D-tulostimen tulostustilavuus on 1,8 x 1,5 m x 1,2 m. Tulostin käyttää kahta samanaikaisesti toimivaa tulostussuutinta (kuva 11, 2). Tulostimella voidaan tulostaa suurempia prototyyppisiä ja jopa huonekaluja. [FIT 2017]

Onnistuneen kappaleen tulostamiseen vaikuttaa moni asia materiaalista tulostusasetuksiin ja jälkityöstöön asti. Jotta 3D-tulostamisesta saadaan täysi potentiaali esille, täytyy teknologian antamia mahdollisuuksia hyödyntää jo kappaleen suunnitteluvaiheessa. Perinteisesti suunnitellut kappaleet on muotoiltu niitä valmistavien tuotantomenetelmien vapausasteita noudattaen. Tästä syystä uutta menetelmää käytettäessä ei kannata suoraan kopioida esimerkiksi koneistamalla valmistettua tuotetta, sillä se kärsisi samoista rajoitteista kuin koneistamalla valmistettu tuote. Suunnittelussa kannattaa aloittaa puhtaalta pöydältä ja suunnitella materiaalia lisäävän valmistustapojen ehdoilla (Chekurov et al. 2017). DFAM (engl. Design for Additive Manufacturing) tarkoittaa 3D-tulostamiseen tarkoitettujen kappaleiden muotojen suunnittelua. Siinä otetaan huomioon materiaalia lisäävän valmistusmenetelmien hyötyjä ja rajoitteita. DFAM sallii suunnittelijoiden suunnitella topologisesti optimoituja kappaleita ja monimutkaisia kappaleita.

3.2.2 FDM-menetelmässä käytetyt tulostusmateriaalit

FDM-menetelmässä käytetyimmät materiaalit muodostuvat täysin tai osittain termoplastisista sidosaineista ja niiltä vaaditaan sulatyöstettävyyttä. Sulaneella materiaalilla pitää olla kyky virrata lämmitettäessä ja jäähmettyä, jotta tulostusmateriaali pehmentyisi kuumennettaessa tulostuspäätteessä ja kovettuisi tulostusalustalle tai tulostetun materiaalin päälle jäähdyttyään (Dudek 2013; Horvath 2014). Materiaalihävikkiä syntyy ainoastaan tukimateriaalien käytöstä. Hävikin synty onkin materiaalia poistaviin menetelmiin sekä muihin 3D-tulostusmenetelmiin verrattuna minimaalinen (Dudek 2013; Chekurov et al. 2017).

Tulostusmateriaali on nauhamaista kelalle pyöritettyä filamenttia, joka asennetaan tulostimeen ja jonka vaihtaminen ja käsitteleminen on helppoa. Filamenttinauhan tyypillinen halkaisija on 1,75 mm tai 2,85 mm. Filamentteja on saatavilla eri värisinä ja useista eri materiaaleista valmistettuna. Yleisimpiä käytettyjä materiaaleja FDM-menetelmässä ovat **polyaktidi (PLA)** ja **akryylinitriilibutadienistyreeni (ABS)**. (Dudek 2013; Horvath 2014; Evans 2012).

PLA on biohajoava polymeeri, joka valmistetaan maissitärkkelyksestä tai sokerijuurikkaasta. PLA:n tulostuslämpötila on noin 180-210 °C eikä sen tulostuksessa ole välttämätöntä käyttää lämmitettyä tulostusalustaa niin kuin usealla muulla materiaalilla tulostettaessa. Käytettäessä noin 60 °C asteeseen lämmitettyä tulostusalustaa saadaan kuitenkin usein parannettua tulostuslaatua. (Evans 2012; Horvath 2014). PLA on oikeissa olosuhteissa biohajoava materiaali ja se on ympäristöystävällisempi petrokemikaaleihin verrattuna. Sitä voidaan tulostaa suoraan puhtaan lasisen tulostusalustan päälle, siinä tapauksessa, että käytetään lämmitettyä tulostusalustaa (Horvath 2014). PLA:n huono puoli on sen pehmeneminen kuumissa olosuhteissa. Tutkimuksissa (Horvath 2014, Evans 2012) on huomattu, että PLA pehmenee jo alle 100 °C:ksen lämpötilassa, joten sen käyttöä ei suositella kuumissa olosuhteissa. PLA:ta voidaan käyttää myös yhdessä muiden materiaalien kuten puukuitujen kanssa, jolloin saadaan aikaan hienoja materiaalikuvioita ja pintoja.

ABS:aa käytetään monien lelujen, kuten legojen, rakennusmateriaalina. Se on kovaa ja kestävä muovia ja kestää PLA:han verrattuna paremmin kuumuutta. ABS:n tulostuslämpötila on noin 210-240 °C. Sitä voidaan hioa ja maalata. Tarvittaviin liimauksiin voidaan käyttää ABS:lle tarkoitettuja erikoisliimoja (Evans 2012). ABS soveltuu myös hyvin tukirakenteiden käyttämiseen, sillä niiden irrottaminen ABS:llä tulostettuna on moniin muihin materiaaleihin verrattuna helpompaa (Horvath 2014). Huonoina puolina on ABS:n käyristyminen jäähtyessä. Tästä syystä, lämmitetyn tulostusalustan käyttö on usein tarpeellista hyvän tulostuslaadun varmistamiseksi. Tulostusalustan sopiva lämpötila ABS:llä tulostettaessa on noin 110-115 °C. (Evans 2012; Horvath 2014)

Muita vähemmän käytettyjä materiaaleja ovat nailonit, polykarbonaatit (PC), termoplastiset elastomeerit (TPE), polyeteenit (HDPE), Polyvinyylialkoholi (PVA) ja polyetyleenitereftalaatti (PET) (Evans 2012; Horvath 2014). Näiden lisäksi uusia materiaaleja kehitetään ja testataan jatkuvasti. Suomessa on valmistettu filamentteja muun muassa kierrätyskumista ja polypropeenista (Paukkeri 2016) sekä selluloosasta (Kangas 2014).

3.2.3 Tulostusasetukset ja tulostaminen

Kuten alaluvussa 3.1.3 mainittiin, mallin viipaloinnin yhteydessä asetetaan 3D-tulostukseen liittyvät asetukset, joiden perusteella tulostin pursottaa materiaalia tulostusvaiheessa. Asetuksiin ei ole olemassa kaikkiiin malleihin sopivia yhteisiä parametreja, vaan ne riippuvat käytetystä materiaalista, kappaleen muodosta ja koosta (Horvath 2014).

Ensimmäinen merkittävä toimenpide ennen tulostuksen aloittamista on varmistaa, että malli on kiinni tulostusalustassa ja pysyy kiinni siinä kauttaaltaan myös materiaalin jäähtyessä. Tulostaminen alkaa aina reunuksen (eng. skirt) tulostuksella, joka tarkoittaa mallin ympärille tulostettavia kierroksia. Näiden tarkoitus on sekä näyttää mille alueelle tulostettava kappale tulostetaan, että osoittaa filamentin virheettömyys. Reunuksen jälkeen voi tapauksissa, joissa ensimmäiset kerrokset ovat ohuita tai tulostettavalla kappaleella tulee olemaan paljon korkeutta, olla tarpeellista tulostaa reunuksille vahvike (eng. brim). Vahvikkeella voi ehkäistä esimerkiksi mallin kaatumisen myöhemmässä vaiheessa ja edistää sen tarttuminen kunnolla tulostusalustaan. Muita tulostusasetuksia ovat muun muassa:

- Kerroskorkeus
- Ensimmäisen kerroksen korkeus
- Ympäryskerrosten lukumäärä
- Ensimmäisen ja viimeisten kerrosten lukumäärä
- Tulostettavan kerroksen täyttöprosentti
- Täyttökuvio
- Tulostusnopeus
- Tulostuslämpötila
- Kappaleen sijoittaminen tulostusalustalle ja
- Skaalaus
- Tukirakenteiden käyttö

Aikaisemmin esitelty G-puristin tulostettiin TTY:n kirjaston 3D-tulostimella. Mallin tulostuksessa ei tarvinnut käyttää tukimateriaaleja. Malli tulostettiin taulukon 5 mukaisilla tulostusasetuksilla.

Taulukko 5. Osa G-puristimen tulostusasetuksista.

Ominaisuus	Asetus
Materiaalin täyttöprosentti	25 %
Täyttökuvio	Rectilinear
Tulostusmateriaali	PLA
Filamentin koko	1,75 mm
Kerrospaksuus	0,2 mm
Tulostusaika yhteensä	3 h 15 min

Valmiissa 3D-tulostamiseen tarkoitetuissa malleissa on valmiiksi mallin suunnittelijan suosittelemat tulostusasetukset. Käyttäjä voi halutessaan muuttaa asetuksia, esimerkiksi täyttöä luoden vahvemman rungon. G-puristimen tulostamisessa käytettiin muissa asetuksissa vakioasetuksia, jotka oli asetettu malliin valmiiksi.

Tulostusasetusten asettamisen jälkeen malli viipaloitiin, jolloin siitä generoitiin G-koodi. Malli tulostettiin PLA-muovista, jota oli tulostamishetkellä saatavana mustan värisenä. Malli tulostettiin kolmesta osasta; ruuvista, nupista sekä kannattimesta. Jokainen osa tulostettiin erikseen valmiiksi asetetulla tulostussuunnalla. Nuppi ja ruuvi tulostettiin pystyssä ja kannatin vaakasuorassa, jolloin yhtäkään yli 45 asteen kulmaa ei syntynyt ja malli voitiin tulostaa ilman tukirakenteita.

Kuvassa 12 on valmis tulostettu G-puristin, joka on osoittautunut kestäväksi ja hyödylliseksi liimauksissa, vaikka se tulostettiin vain 25 % täytöllä. Vahvemmaksi kappaleen saisi tulostamalla se täysin umpinaisena, jolloin sisälle ei synny lainkaan tyhjää tilaa. Asetusten muuttaminen vaikuttaa kuitenkin tulostusaikaan. Kyseisen mallin tulostaminen 100 % täytöllä olisi kasvattanut tulostusaikaa 11:een tuntiin.



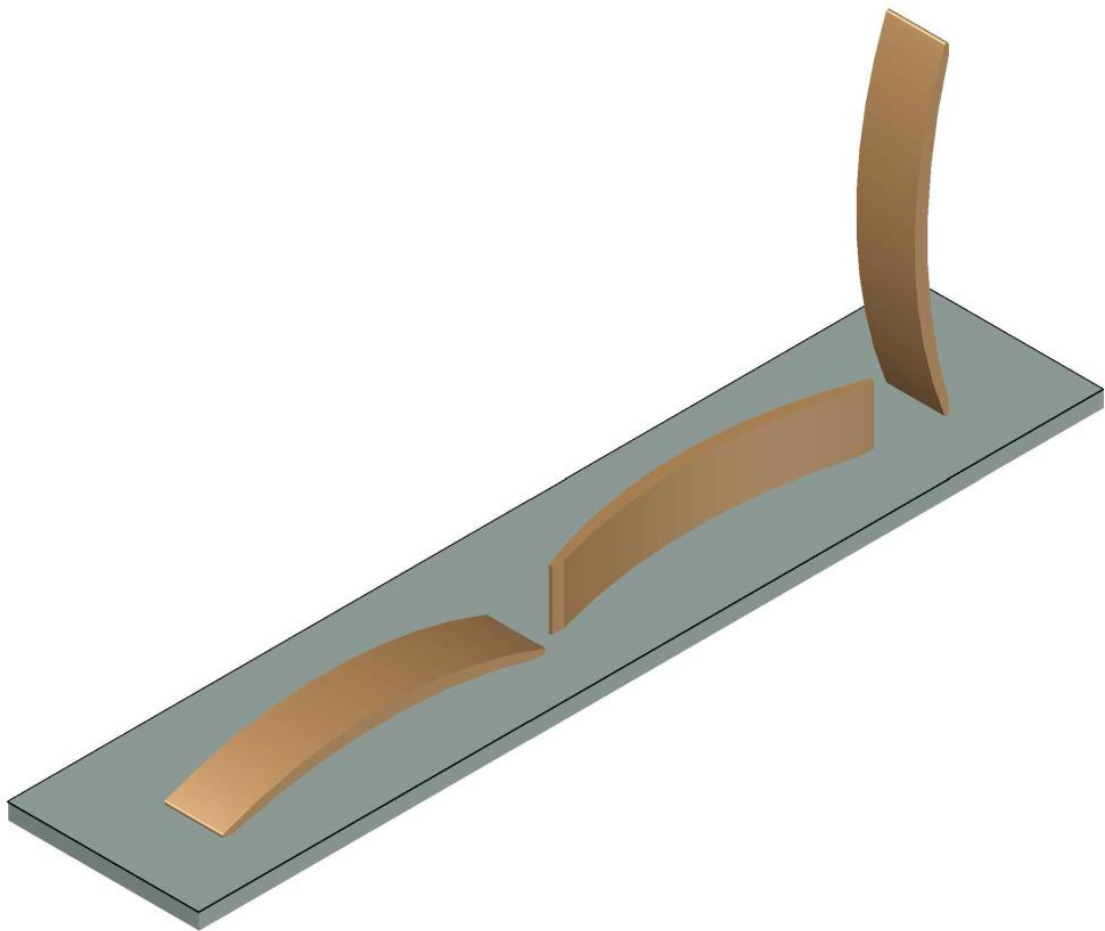
Kuva 12. PLA-muovista 3D-tulostettu toimiva G-puristin.

3.2.4 Tulostushaasteet ja havainnot 3D-tulostamisesta

Tutkimuksen aikana tulostettiin lukuisia valmiita malleja avoimesta lähdekoodista, pienoismalleja luonnosvaiheen siltamalleista sekä pienempiä pienoismalleja ennen alaluvun 5.3.2 pienoismallin 3D-tulostusta. 3D-tulostetut kappaleet opettivat 3D-tulostukseen liittyvistä tulostushaasteista ja ominaisista piirteistä. Alustavissa koekuormituksissa huomattiin, että tulostussuunnalla ja kuormitussuunnalla on merkittävä vaikutus kuormitettavan kappaleen lujuuteen murtotilanteessa.

3D-tulostuksissa ilmenneitä haasteita olivat PLA:lla tulostettaessa kappaleen irtoaminen tulostusalustasta, materiaalisyytön sotkeentuminen ja sitä kautta epäonnistunut tuloste ja rakojen jääminen tulostettavien kerrosten väliin. Kappaleen irtoamiseen tulostusalustasta estettiin myöhemmissä tulostuksissa lisäämällä tukireuna kappaleen ympärille (eng. brim). Kappaleen irrotessa tukireunasta huolimatta vaihdettiin kappaleen asentoa tulostusalustaan nähden. Mitä isompi pinta-ala kosketi tulostusalustaa, sitä parempi kiinnitys kappaleella oli alustaan. Osa ongelmista johtui myös kalibroinnista. Tulostusalusta ei ollut eräissä tapauksissa kalibroitu oikein, josta johtui suuttimen korkeuserot tulostustasoon nähden. Tämä aiheutti materiaalin epätasaisen kiinnityksen alustaan ja pahimmillaan kappaleen irtoamisen. Muita tutkimuksen alussa ja toteutuneen pienoismallin 3D-tulostuksessa ilmenneitä tulostushaasteita on esitetty yhteenvedon taulukossa.

Tulostussuunnalla oli merkittävä vaikutus kappaleiden lujuuteen koekuormituksissa. Mahdollisia tulostussuuntia oli kolme (kuva 13).



Kuva 13. Tulostussuunnat.

Vasemmanpuolimmaisessa tulostussuunnassa silta on tulostusalustassa kiinni samassa asennossa kuin lopullisessa käyttötarkoituksessa. Tässä asennossa siltaa ei ollut kuitenkaan mahdollista tulostaa ilman tukirakenteita, joten jäljelle jäi pituussuuntaan (kuvassa keskellä) ja poikittaissuuntaan (kuvassa oikealla) tulostus. Kappaleet kestivät parhaiten kuormitusta, kun ne oli tulostettu jatkuvina kerroksina syntyvien jännitystilojen mukaan. Kuormitettuun siltaan syntyy pituussuuntaan vetojännitystila yläpintaan ja puristusjännitystila alapintaan. Paras kestävyys saatiin sillalle, kun se tulostettiin pituussuuntaisesti kyljellään (kuvassa keskellä), koska tällöin kerrokset olivat jatkuvia pituussuuntaisesti, jossa rasiutusta syntyy ja epäjatkuvia poikittaissuuntaan, jossa rasiutusta ei synny. Alustavissa 3D-tulostuksissa havaittiin, että pituussuuntaisesti tulostettu kappale oli taivutuslujuudeltaan yli kolminkertainen samankokoiseen poikittaissuuntaisesti tulostettuun kappaleeseen verrattuna.

4. 3D-TULOSTAMINEN RAKENNUSALALLA

3D-tulostetuista rakenteista ei enää puhuta tulevaisuuden tuotteina, vaan rakenneosaelementtejä, osia teollisuuden käyttöön ja rakenteita on tulostettu niin maailmalla kuin Suomessakin. Tässä tutkimusosiossa esitellään muutamia 3D-tulostamisen parissa työskenteleviä yrityksiä ja heidän toteutuneita tai suunnitteilla olevia tuotteitaan Suomessa ja maailmalla. Alaluvussa 4.1 esitellään Suomessa ja alaluvussa 4.2 ulkomailla toimivia yrityksiä ja heidän tuotteitaan.

4.1 Yksityiset toimijat Suomessa

3D-tulostaminen on Suomessa vielä uusi ilmiö. 3D-tulostimia on markkinoilla eri yrityksillä, mutta kaupallistaminen on vasta aluillaan.

4.1.1 FIMAtec

FIMAtec (Finnish Intelligent Module Apartments oy) lanseerasi vuonna 2017 maailman suurimman elementtitehtaisiin suunnitellun 3D-tulostimen (Kakkonen-yhtiöt 2017). Betonin tulostus on perustunut pitkälti pursotukseen, mutta raudoitukset ja eristeet on aikaisemmin asennettu erikseen rakenteisiin. FIMAtecin tulostimessa elementin kuorien lisäksi, sisäeriste ja raudoitus asennetaan automaattisesti tulostusprosessin aikana, jolloin lopputuotteena saadaan tulostettua esimerkiksi kuvan 14 mukainen valmis elementtiseinä.



Kuva 14. Robocatt-tulostin ja sillä tulostettu elementtiseinä. Kuva: Fimatec/Youtube.

Keskivertokokoa oleva elementtiseinä valmistuu tulostimella noin 40:ssä minuutissa, kun vastaavanlaisen elementin tekoon perinteisellä tavalla elementtitehtaalla kestää yhden työpäivän (Ylönen 2017). RoboCattiksi nimetyn tulostimen mitat ovat 8 x 6 x 5,5 m ja pituutta voidaan jatkaa 16 metriin asti (Kakkonen-yhtiöt 2017). Uudella tulostimella voidaan tulostaa myös kaarevia muotoja (kuva 15). FIMAtec on Imatralainen start-up yritys, joka perustettiin vuonna 2013.



Kuva 15. Robocattin tulostama kaareva elementtiseinä. Kuva: Mikko Savolainen/Yle.

4.1.2 3DStep

3DStep on suomalainen metallien, muovien, komposiittien ja elintarvikkeiden kuten suklaan 3D-tulostusyritys. Yrityksellä on käytössään tällä hetkellä Suomen edistynein metallitulostin (Marttila 2016), jonka avulla on tulostettu kappaleita teollisuuden käyttöön. Tulostimella on tulostettu mm. massaltaan optimoitu sarana (kuva 16), sekä tarvittavilla jäähdytysominaisuuksiltaan tehostettu suutin (kuva 17)



Kuva 16. Materiaaliltaan optimoitu sarana. Suunnittelu: Enmac Oy, valmistus: 3DStep Oy. Kuva: <http://3dstep.fi/>

Saranan suunnittelun lähtökohtana oli painon vähentäminen. Sarana on 75 % kevyempi kuin perinteisellä menetelmällä valmistettu sarana, mutta kantaa silti sille suunnitellut kuormat (Marttila 2016). Saranan muoto suunniteltiin laskennallisesti kestäämään sille asetettu kuormitustilanne.



Kuva 17. Suutin, jossa jäähdytys on optimoitu jäähdytyskanavien suunnittelulla. Suunnittelu: Enmac Oy, valmistus: 3DStep Oy. Kuva: <http://3dstep.fi/>

Suuttimen lähtökohtana oli saada suuttimen läpi virtaavan nesteen jäähdytys optimaaliseksi. Jäähdytyskanavat suunniteltiin spiraalimaiseksi lähelle seinämää. Kappale tulostettiin yhdestä osasta.

Suutin ja sarana ovat tulostettu jauhopetisulatusjärjestelmää käyttävällä SLM 280HL metallitulostimella (kuva 18). Molempien kappaleiden tulostusmateriaalina on käytetty alumiiniseosta AlSi10Mg. 3D-metallitulostin painaa 1500 kg ja sen tulostustilavuus on $280 \times 280 \times 365 \text{ mm}^3$.



Kuva 18. SLM 280HL metallitulostin. Kuva: Timo Marttila/Aamulehti.

4.2 Toimijat maailmalla

3D-tulostaminen on tänä vuosikymmenenä kiihtynyt radikaalisti maailmalla ja uutisia sekä teollisia artikkeleita tulostamiseen liittyen tulee jatkuvasti lisää. Kaikkien merkittävimpien yritysten esittely vaatisi oman tutkimuksensa laajan skaalan vuoksi. Siksi tässä tutkimuksessa rajaus esiteltäviin yrityksiin jouduttiin tekemään esitellen vain muutaman toimijan 3D-tulostamisen saralla.

4.2.1 MX3D

Hollantilainen MX3D tekee robotiikkaan ja 3D-tulostekniikoihin liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä. Eräs suurin yrityksen innovaatio on sen kehittämä moniakselinen 3D-tulostusrobotti (kuva 19), jolla voi tulostaa metalleja ilmassa tarvitsematta tukirakenteita. Robotti toimii ul-

koilmassa ja se pystyy liikkumaan ja tulostamaan metallia kaikkiin suuntiin. Uudella tulostusmenetelmällä voidaan tulostaa ulkoilmassa suoraan paikalleen rakenteita, jotka perinteisesti on tulostettu tulostimen sisään tulostustilaan.



Kuva 19. MX3D:n tulostinrobotti tulostamassa metallista pienoismallia. Kuva: MX3D kotisivu.

Tulostusrobotin toiminta perustuu robottikäden metallilangan hitsaamiseen kerros kerrokselta. Robotti syöttää metallilankaa, jonka se hitsaa liikkuen samalla etukäteen ohjelmoituun suuntaan pystyen tulostamaan metallia kaikkiin suuntiin. Isojen rakenteiden rajoituksena on robotin kyky tulostaa vain käsiensä ulottumien verran metallia. (Palermo 2015)

MX3D:n alkuperäinen tarkoitus oli tulostaa kokonainen kävelysilta Amsterdamin vanhan kaanalin yli suoraan paikalleen robottien avulla. Projektin ajatuksena oli, että robotit etenisivät rakentamaansa siltaa pitkin suunniteltujen kiskojen päällä tulostaen siltaa osa osalta. Paikan päällä tulostamisesta jouduttiin kuitenkin luopumaan projektissa esiintyneiden haasteiden takia ja viimeisimmän päivityksen mukaan (09/2017) silta tulostetaan etukäteen tehtaalla kokonaisuudessaan (kuva 20) ja tämän jälkeen tuodaan siltapaikalle asennettavaksi. Sillan suunnittelussa on otettu huomioon kevyen liikenteen sillan kuormat. Sillan suunnittelijana on Joris Laarman lab.



Kuva 20. Luonnos MX3D:n 3D-tulostettavasta sillasta. Kuva: MX3D kotisivu.

4.2.2 WinSun

Kiinalaisyritys, WinSun on pystyttänyt kuusikerroksisen kerrostalon (kuva 21) Suzhoun teknilliseen puistoon 3D-tulostamalla rakennuksen elementit. Yrityksen käyttämä 3D-tulostin on kooltaan 6,6 m korkea, 10 m leveä ja 40 m pitkä. Elementit tulostettiin etukäteen yrityksen tehtaalla, jonka jälkeen rakenteisiin lisättiin rauditus ja eristeet työmaalla paikallisten rakentamismääräysten mukaan. Tulostettavien kappaleiden tarkempaa kokoa ei ole ilmoitettu. (Stevenson 2015)

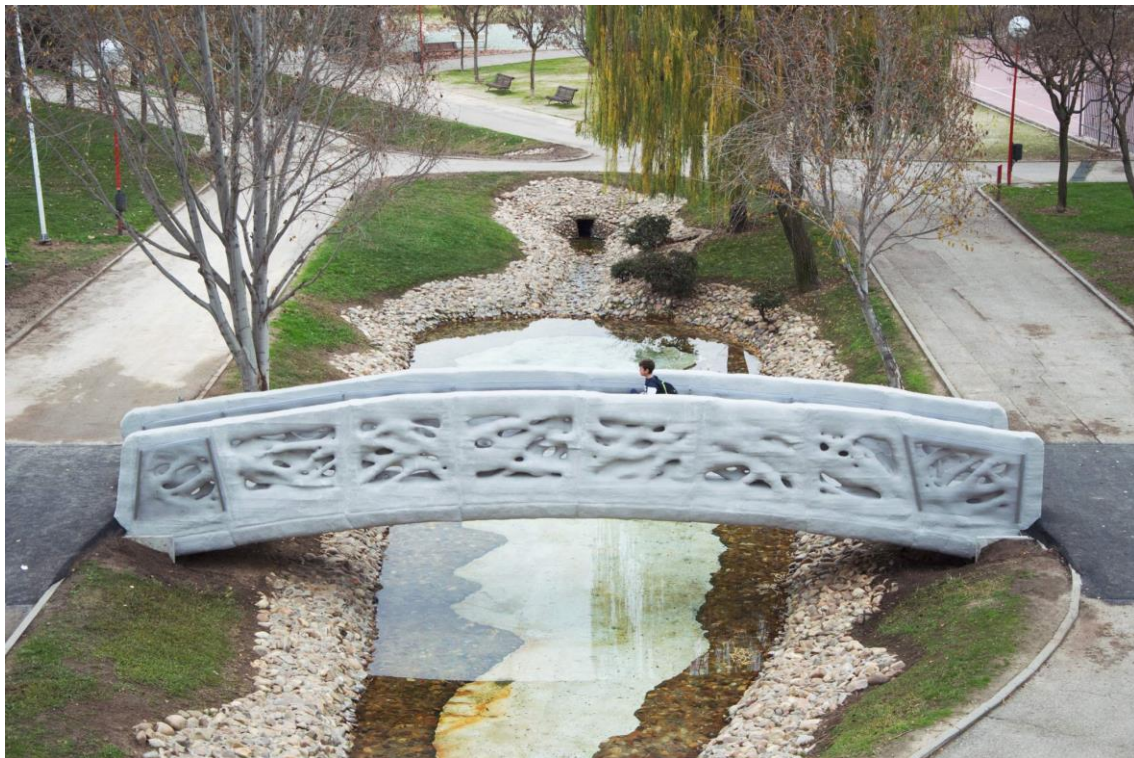


Kuva 21. 3D-tulostetuista elementeistä rakennettu kerrostalo. Kuva: <https://3dprint.com/>

4.2.3 Institute for advanced architecture of Catalonia

Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) on Espanjan Barcelonassa toimiva opetus- ja tutkimuskeskus, jonka pyrkimyksenä on arkkitehtuurin kehittäminen nykymaailman asumisen tarpeisiin. IAAC on tehnyt tutkimustyötä Brasiliassa, Taiwanissa, Kroatiaassa ja Romaniassa. (Iaac kotisivu)

Yritys tekee tutkimus- ja kehitystyötä myös 3D-tulostamisen saralla. Espanjan Madridiin tu-
lostettiin alkuvuodesta 2017 betoninen kevyen liikenteen silta (kuva 22). Sillan pituus on 12 m ja leveys 1,75 m ja se sijaitsee Madridissa, Castilla-La Manchin puistossa. (The Local 2017)



Kuva 22. Luonnon muotoja jäljittelevä 3D-tulostettu silta Espanjan Madridissa. Kuva: Iaac kotisivu.

Betoninen silta on koottu kahdeksasta moduuliosasta, jotka on vahvistettu polypropeenikuiduilla. Sillan suunnittelussa on hyödynnetty parametrissa suunnittelua, jonka avulla voidaan optimoida materiaalin jakautumista rakenteessa ja maksimoida rakenteellinen kestävyys (The Local 2017). Suunnitteluryhmän mukaan sillan muodon suunnittelussa pyrittiin kuvaamaan luonnon monimutkaisuutta.

5. PIENOISMALLIN SUUNNITTELUN JA TOTEUTUKSEN VAIHEET

Tässä luvussa kerrotaan sillan suunnittelusta, tutkimuksessa toteutuneen pienoismallin suunnittelusta sekä sen koekuormituksesta. Sillan suunnittelu aloitettiin DFAM-tyyppisellä ajattelulla, eli tiedostamalla FDM-menetelmän antamat vapausasteet ja suunnittelemalla silta niiden sallimissa rajoissa.

Alaluvussa 5.1 kerrotaan suunnitteluperusteista, jotka otetaan tavallisesti huomioon suunniteltaessa kevyen liikenteen siltaa Suomen olosuhteisiin. Alaluvussa 5.2 kerrotaan käytetyn materiaalin ominaisuuksista. Alaluvussa 5.3 suunnitteluprosessista sillan suunnittelusta, pienoismallin 3D-tulostukseen ja koekuormitukseen.

5.1 Lähtötiedot ja suunnitteluperusteet kevyen liikenteen sillan tapauksessa

Siltojen suunnittelu tapahtuu Suomessa tavallisesti Eurokoodien, niiden kansallisten siltoja koskevien liitteiden sekä liikenneviraston soveltamisohjeiden NCCI- sarjojen mukaan. Kuormitus ja mitoitus tehdään määrättyjen siltaan kohdistuvan kuormien mukaan, jotka on määritetty Liikenneviraston soveltamisohjeessa NCCI 1 (2014). Ohjeessa on määrätty kevyen liikenteen sillan suunnittelussa vaaditut pystysuorien ja vaakasuorien kuormien staattiset arvot sekä kuormitusyhdistelyissä käytetyt kertoimet, joita käytetään haettaessa mitoittavimman kuormitustapauksen, jonka perusteella sillan mitoitus tehdään. Pysyvien kuormien sekä muuttuvien kuormien lisäksi mitoituksessa otetaan huomioon työnaikaiset kuormat sekä onnettomuuskuorma. Näiden lisäksi myös sillan liikennemäärästä riippuva värähtelymitoitus on tehtävä NCCI 1 (2014).

Mitoituksessa otetaan huomioon myös Suomen sääolosuhteet käyttämällä mitoituksessa lämpötilakuormaa. Tyypillisen betonisillan maksimilämpötila on 2 °C ja minimilämpötila 8 °C ulkoilman ääriarvoja korkeampi. Tällöin esimerkiksi vaihteluvälillä -40...+40 °C, on lämpötilan laskun rakenteelle äärimmillään -50 °C. Suomessa käytetään talviolosuhteissa suolausta, joten käytetyiltä materiaaleista vaaditaan kestävyyttä kloridirasituksia vastaan. NCCI 2:ssa (2012) on määritetty betonin suojabetonipeitteet, joiden pitää täytyä raudoitteen ympärillä suunniteltaessa rakenne raudoitetusta betonista. Vastaavasti myös muista materiaaleista suunnitelluista rakenteista vaaditaan kestävyyttä kemikaaleja vastaan. Lämpötilakuormien ja kemikaalisrasituksen lisäksi sillanrakennuksessa käytetyiltä materiaaleilta vaaditaan jäykkyyttä ja kestävyyttä sekä lyhytaikaisia rasituksia, että pitkäaikaisia rasituksia vastaan.

Edellä mainittujen kuormien perusteella tehdään mitoitusarkastelut, joilla varmistetaan käytetyn materiaalin soveltuminen sekä sillan kestävyys. Mitoitusarkasteluissa selvitetään muun muassa taivutus- ja leikkauskestävyys, tehdään värähtely- ja taipumatarkastelut sekä määritetään käyttöikä, jonka sillan materiaali tulee kestää siltapaikalla.

5.2 Materiaalitiedot

Tutkimuksessa käytettiin UPM:n Formi 3D-tulostamiseen tarkoitettua puukomposiittia. Materiaali koostuu pääosin PLA-muovista ja siinä on mukana myös selluloosakuituja, jotka on valmistettu sertifioitujen metsien puista. Formi 3D voidaan polttaa energiantuotantoa varten. Materiaali on kehitetty yksinomaan 3D-tulostamista varten kehittämällä ja testaamalla eri materiaali reseptejä. Materiaalista kehitettiin useita reseptejä, kunnes sopivan reseptin löydyttyä siitä kehitettiin filamenttia tulostamista varten. Tulostetussa sillassa käytetyn materiaali reseptin ominaisuuksia 3D-tulostetuille kappaleille on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. UPM Formi 3D:n lujuusominaisuudet. Lähde: UPM.

Ominaisuus	Arvo	Yksikkö
Iskulujuus	11	kJ/m^2
Vetolujuus	17,5	MPa
Taivutusmoduuli	1500	MPa
Taivutuslujuus	25	MPa
Tiheys	1000	kg/m^3

Enemmän tietoa materiaalista löytyy liitteestä A, jossa on esitetty myös standardit, joiden mukaan lujuusominaisuudet on testattu ruiskupuristetuille kappaleille. Taulukossa 6 esiintyvät materiaalitiedot ovat 3D-tulostetuille kappaleille, joille ei vielä ole olemassa lujuusstandardia. Materiaali on verrattavissa esimerkiksi sahatavaraan C30, jonka taivutuslujuus on 30 MPa ja vetolujuus 18 MPa. Tiheydeltään se on kuitenkin noin kolminkertainen C30:seen verrattuna täydellä täyttöasteella tulostettuna.

Jäykkyyspainosuhte mitoittaa usein puurakenteiset sillat. Materiaalin vetolujuus- ja jäykkyyspainosuhteesta tehtiin vertailua sahatavaran C30 (Puuinfo 2011) ja teräslaadun (NCCI 4 2016) B500B kanssa. Vertailussa aloitettiin määrittämällä kunkin materiaalin tiheydet, vetolujuudet sekä kimmomoduulit. Sahatavaralle C30 on ilmoitettu vahvemman suunnan vetolujuus sekä kimmomoduuli eli arvot syiden suunnassa. Ilmoitettu puutavaran tiheys on tiheyden keskiarvo.

Tämän jälkeen laskettiin suhteelliset vetolujuudet ja jäykkyydet jakamalla kunkin materiaalin vetolujuudet ja kimmomoduulit kyseisen materiaalin tiheydellä. Tulokset laskennasta näkyvät taulukossa 7.

Taulukko 7. Vertailua eri materiaalien lujuuspainon- ja jäykkyyspainon suhteen.

Ominaisuudet	Materiaali		
	Sahatavara C30	Teräs A500HW	UPM Formi 3D
Tiheys ρ [g/cm^3]	0,46	7,85	1,0
Vetolujuus R_m [MPa]	18	500	17,5
Suhteellinen lujuus R_m / ρ [MPa x cm^3 / g]	47	64	17,5
Kimmomoduuli E [GPa]	12	200	1,5
Suhteellinen kimmomoduuli E/ρ [GPa x cm^3 / g]	32	25	1,5

Taulukosta 7 huomaa, että materiaalin suhteellinen lujuus on 17,5. Vastaava luku on teräksellä 64 ja sahatavaralla C30 47. Materiaalin lujuuspaino on siis 27 % teräksen lujuuspainosta ja 37 % sahatavaran lujuuspainosta. Materiaalin suhteellinen jäykkyys on 1,5. Vastaava luku on teräksellä 25 ja sahatavaralla C30 32. Materiaalin lujuuspaino on noin 5 % verrattuna teräksen ja sahatavaran jäykkyyspainoon.

Materiaalin jäykkyys on selvitetty lyhytaikaisessa kuormituksessa. Tämän lisäksi pitäisi selvittää jäykkyys myös pitkäaikaisessa kuormituksessa ja tehdä väsytystarkastelu, jotta saataisiin riittävästi tietoa materiaalin soveltumisesta siltojen rakennusaineeksi. Sillat ovat rakenteita, joihin kohdistuu toistuvaa rasitusta ajan kuluessa ja niiden ominaisuudet pitää pysyä riittävän hyvinä myös pitkän ajan kuluessa. Materiaalin ominaisuuksia lämpötilarasituksissa ei ole vielä tutkittu. Kuten alaluvun 5.1, toisessa kappaleessa todettiin, lämpötilavaihtelu Suomessa on suurta, joten ominaisuuksia, kuten iskusitkeyttä, lujuutta ja jäykkyyttä pitäisi tutkia lämpötilan vaihteluvälialueella. Lämpötilarasitusten lisäksi materiaalin kestävyyttä kemikaaleja, erityisesti teiden suolausta ja UV-valoa vastaan tulisi tutkia.

3D-tulostettaessa isompia kappaleita materiaalilla on ominaisuutena jäähtyessään käyristyä aiheuttaen geometrian muuttumista. Stabiilisuutta saadaan parannettua käyttämällä lämmitettyä tulostusalustaa ja tukireunaa, kuten tutkimuksen teoriaosuudessa kerrottiin. Kappaleet käyristyvät kuitenkin tästä huolimatta, joka pitää ottaa huomioon isompien kappaleiden 3D-tulostuksessa. Tällöin voidaan esimerkiksi tulostaa isompi kappale useassa osassa ja suunnitella niiden väliset liitokset.

Voidaan todeta, että materiaali ei vielä kyseisellä reseptillä ole kovin lujaa tai jäykkää. Kehittämällä kuitutekniikkaa materiaalissa voidaan todennäköisesti vahvistaa edellä mainittuja lukuja ja lisäämällä jatkuvaa kuiturakennetta saada aikaiseksi vahvempaa tulostusmateriaalia kuitututkimuksen teoriaosuudessa todettiin. Materiaalista pitää jatkossa selvittää ainakin sen pitkäaikaiskestävyys, jäykkyys lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa kuormituksessa sekä materiaalin käyttäytyminen ja lujuuden kehittyminen ajan, lämpötilan ja kemikaalirasitusten vaikutuksien alaisina.

5.3 Suunnittelu tutkimuksen rajauksien mukaisesti

Projektin pilottikohtaisen luonteen takia, jouduttiin suunnittelu tekemään soveltaen määräyksiä, ohjeita, omaa tietoa ja projektin osapuolten osaamista, sillä 3D-tulostetun sillan suunnittelua ei ole tutkimuksen tekovaiheessa standardisoitu. Ylipäätään 3D-tulostettujen rakenteiden suunnittelu ja toteutus ovat yksilöllisiä ja yleiskattavaa ohjetta ei ole olemassa.

Suunnittelutyössä aloitettiin työ määrittämällä suunniteltavalle sillalle alustavat mitat, käytöikä ja vaadittava kestävyys projektin osapuolten kesken. Lähtötiedot asetettiin yhteisten palaverien kautta ottaen huomioon projektin aikataulun, tulostusnopeuden ja tulostimien tulostusalat. Suunnittelun lähtökohtina oli eurokoodien ja liikenneviraston ohjeiden sijaan olemassa olevan tiedon soveltaminen, kirjallisuudesta löytyvä aineisto sekä testausmenetelmät kestävän sillan suunnittelua varten. Suunnittelussa ei siis käytetty kuormituksina liikenneviraston ohjeiden mukaisia suunnittelukuormia vaan projektikohtaisesti määrättyjä kuormituksia. Mitoitus-tarkasteluissa ei myöskään käytetty Suomessa käytettäviä tarkasteluja vaan tutkittavaksi otettiin ainoastaan taivutuslujuustarkastelu.

Suunnittelun kautta haluttiin saada tietoa sillan soveltuvuudesta 3D-tulostukseen. Laskentamallien lisäksi tämä haluttiin varmistaa koekuormittamalla suunniteltu silta. Tarpeeksi isoa 3D-tulostinta ei ole olemassa, jolla saisi kokonaisen siltarakenteen tulostettua. Tästä syystä suunniteltiin sillan laskentamallin lisäksi siitä pienoismalli, jota 3D-tulostuksen jälkeen koekuormittamalla saatiin arvio tekniikan soveltuvuudesta isompien kappaleiden 3D-tulostukseen. Suunnittelussa aloitettiin sillan suunnittelusta, jonka perusteella luotiin skaalattu pienoismalli 3D-tulostusta ja koekuormitusta varten. Pienoismallin laskentamallia verrattiin koekuormitus-tulokseen. Suunnittelun etenemistä on kuvattu kuvassa 23.



Kuva 23. Suunnitteluprosessi.

Vaiheessa 1, suunniteltiin oikeassa koossa oleva kevyen liikenteen silta määrittämällä kansi-laatan geometria, kuormitukset ja luomalla laskentamalli rasitustarkasteluja varten. Seuraavaksi, vaiheessa 2, 3D-tulostettiin sillan geometriasta skaalattu pienoismalli, jota koekuormitettiin vaiheessa 3. Lopuksi verrattiin tuloksia pienoismallin koekuormituksesta pienoismallista luotuun laskentamalliin. Vaiheessa 2 huomattiin, että 3D-tulostetun pienoismallin geometria oli hieman muuttunut alkuperäisestä skaalatusta pienoismallista. Tästä syystä sillan geometria piti päivittää vastaamaan skaalausta. Lopuksi alussa suunniteltu sillan laskentamalli päivitettiin vastaamaan pienoismallista skaalattua mallia.

5.3.1 Sillan suunnittelu

Sillan suunnittelussa käytetyt suunnitteluperusteet on listattu alla. Ehdot ovat projektikohtaisesti määrättyjä eivätkä NCCI- sarjojen vaatimuksien mukaisia.

- **Sillan omat parametrit:**
 - Sillan pituus **3 m**
 - Tarpeeksi leveä ihmisen ylikululle
 - Sillan oma paino maksimissaan **100 kg**
- **Sillan kuormitus:**
 - Sillan liikennekuormana käytetään yhden ihmisen painoa (**100 kg**)
 - Liikennekuorma kerrotaan **5:llä**, jolloin saadaan kuormitus murtorajatilassa
 - Omat painot lasketaan ominaisarvona
 - Elementin koko laskentamalleihin noin 10 mm
- **Sillan kestävyys:**
 - Suunnitellaan vain pintakerrokset kantaviksi
 - Siltaan syntyvä taivutusjännitys pienempi kuin materiaalin taivutuslujuus ominaislujuutena
 - Muita kuin taivutuskestävyystarkasteluja ei tehdä

5.3.1.1 Alustava suunnittelu

Sillansuunnittelu alkoi kantavan kansilaatan alustavalla suunnittelulla. Suunnittelun lähtökohdaksi valittiin pistemäinen kuorma, jonka painoksi oletettiin murtorajatilassa 500 kg. Sillansuunnittelussa aloitettiin umpinaisen kansilaatan suunnittelu taulukon 6 mukaisten arvojen mukaan.

Valittu kuormitus edustaa tilannetta, jossa kävelijä seisoo paikallaan sillan keskellä, jolloin puotamiskiihtyvyyden vaikutuksesta luo siltaan pistekuorman taivutusmomenttipinnan. Tämän diplomityön aikana toteutetussa koekuormituksessa jaettiin pistekuorma koko pienoismallin leveydelle. Tällä haluttiin testata, kuormitustilanteessa kennolevyrakenteen kokonaiskestävyyttä eikä kestävyyttä paikallista rasitusta vastaan. Seuraavissa koekuormituksissa on tarkoitus rasittaa koekuormitustilanteessa myös pistemäisellä kuormalla ja verrata tuloksia laskentamalliin.

Sillanmitoituksessa käytetyt kuormat eivät siis edusta kevyen liikenteen sillan mitoituksessa käytettäviä vaatimuksia vaan tässä tutkimuksessa mitoitettiin soveltaen projektissa määrättyä pistekuormaa ja omia painoja, jättäen muut kuormat kuten tuulikuorman, lämpötilakuorman, lumi- ja jääkuorman ynnä muut samanlaiset kuormat pois. Tällöin saatiin mitoituksessa käytetylle pistekuormalle arvoksi:

$$F_{ed} = \gamma_F F, \quad (1)$$

jossa F_{ed} on pistekuorma murtorajatilassa, γ_F pistekuorman osavarmuusluku (5) ja F pistekuorma ominaiskuormana (100 kg). Pistekuorma aiheuttaa yksiaukkoiselle sillalle määräävimmän kuormitustapauksen pistekuorman sijaitessa keskellä siltaa, jolloin on syytä valita mitoitettavan sillan tarkastelukohdaksi keskikohdasta poikkileikkaus sillalla. Suurin syntyvä taivutusmomentti murtorajatilan pistekuormalle on:

$$M_{f.ed} = \frac{F_{ed}L}{4}, \quad (2)$$

jossa $M_{f.ed}$ on suurin pistekuormasta aiheutuva taivutusmomentti ja L on kappaleen pituus. Yhtä lailla voidaan määrittää omasta painosta syntyvä taivutusmomentti olettamalla sillan omasta painosta aiheutuva viivakuorma yhtä suureksi koko sillan pituudelta, jolloin ollaan varmalla puolella mitoituksessa. Ensin määritetään omasta painosta aiheutuva ominaisviivakuorma:

$$q = \gamma HB, \quad (3)$$

jossa q on ominaisviivakuorma, γ on taulukon 6 mukainen materiaalin tilavuuspaino, H on kappaleen korkeus ja B kappaleen leveys. Tällöin mitoitusviivakuorman aiheuttaman taivutusmomentin arvoksi saadaan suurimmillaan ominaisarvona:

$$M_g = \frac{qL^2}{8}, \quad (4)$$

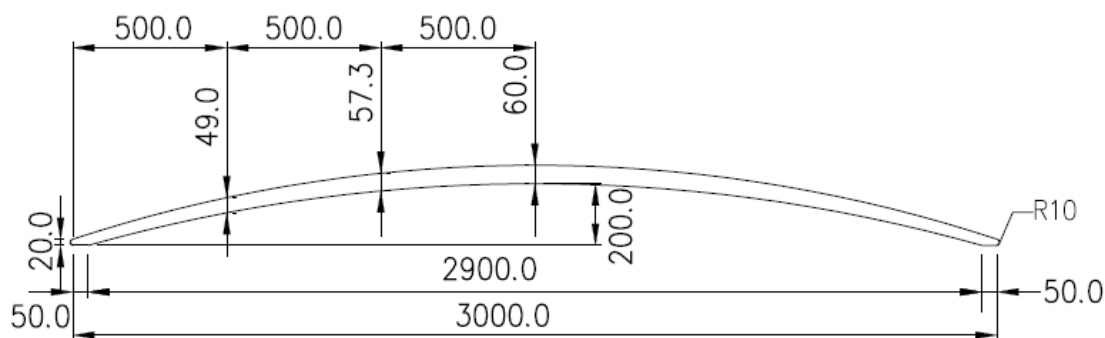
jossa M_g on sillan keskelle syntyvä suurin taivutusmomentti sillan omista painoista. Nyt voitiin laskea suurin syntyvä mitoitustaivutusmomentti keskellä siltaa:

$$M_{ed} = M_{f.ed} + M_g, \quad (5)$$

sekä syntyvä taivutusjännitys:

$$\sigma_{ed} = \frac{M_{ed}}{w}, \quad (6)$$

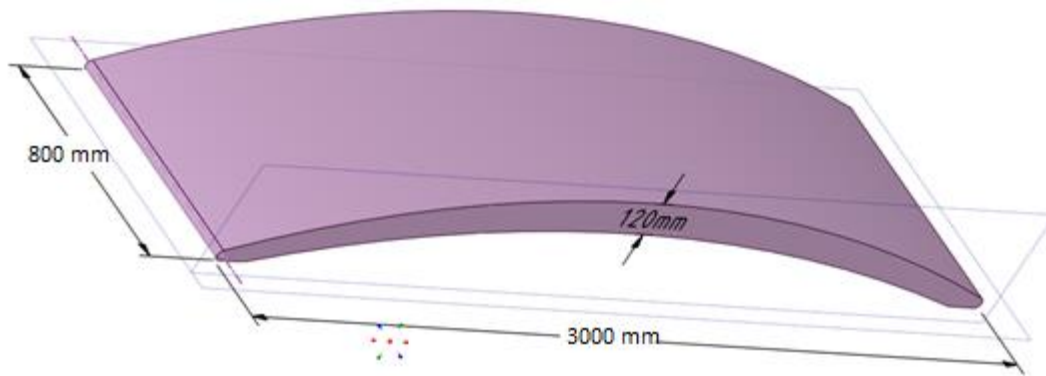
Materiaalin ominaistaivutuslujuus oli taulukon 6 mukaan $f_{mk}=25$ MPa. Tätä käytettiin sallittuna jännityksenä. Siltaan syntyvä taivutusjännitys laskettiin excelillä. Iterointikierrosten jälkeen päädyttiin kuvan 24 mukaiseen geometriaan, jossa siltarakenne on umpinainen ja jossa sillan keskellä syntyvä taivutusjännitys ei ylittänyt ominaislujuutta.



Kuva 24. Sillan alustava geometria.

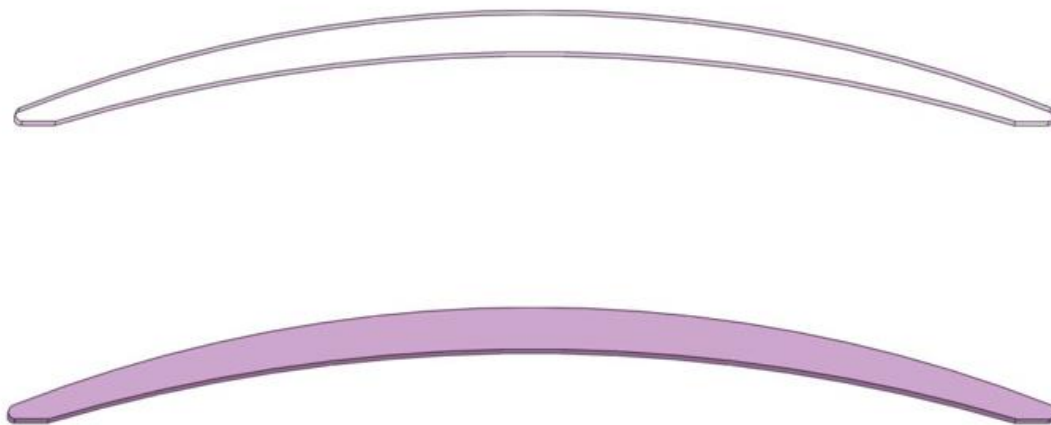
Sillan geometrian laadinnassa pyrittiin luomaan kevyt ja kaareva rakenne, joka olisi helppo tulostaa ja asentaa ilman erillisiä alusrakenteita. Sillan kannesta pyrittiin luomaan helposti liikuteltava ilman purun tai ylimääräisen työn tarvetta. Sillan kaaren geometriasta luotiin helposti yli käveltävä. Liian suuri kaarevuussäde voisi aiheuttaa liukastumisvaaran, mutta liian pieni kaari taas ei välttämättä olisi riittävä esteen tai puron yli. Sillan kaaren korkeudeksi päätettiin 200 mm maanpinnasta. Ilman alusrakenteita toteutettavalle sillalle mallinnettiin molempiin päihin 50 mm:n maanpinnan suuntainen tukialue. Tällöin silta voidaan pystyttää suoraan paikalleen ilman lisärakenteita. Päätyalueet pyöristettiin terävien kulmien välttämiseksi R10-säteellä.

Sillan laskettu oma paino 0,5 m:n levyisenä oli 92,8 kg, jolloin sillan massa oli alle 100 kg ja suunnittelun alkuehdot täyttyivät. Alustavan geometrian mukaan suunnitellut pienoismallit 3D-tulostettiin TTY:n kirjaston 3D-tulostimella PLA-muovista. Tulostustekniikkaan perehdyttäessä huomattiin laaja määrä eri asetuksia tulostettaville kappaleille ja muun muassa täyttökuvion tulostusmahdollisuus tulostettavalle kappaleelle. Alustavien koekuormitusten mukaan pienoismallia rasitettaessa ohut kansilaatta taipui välillä arvaamattomasti. Ongelmana oli kansilaatan jäykkyyden kasvattaminen.

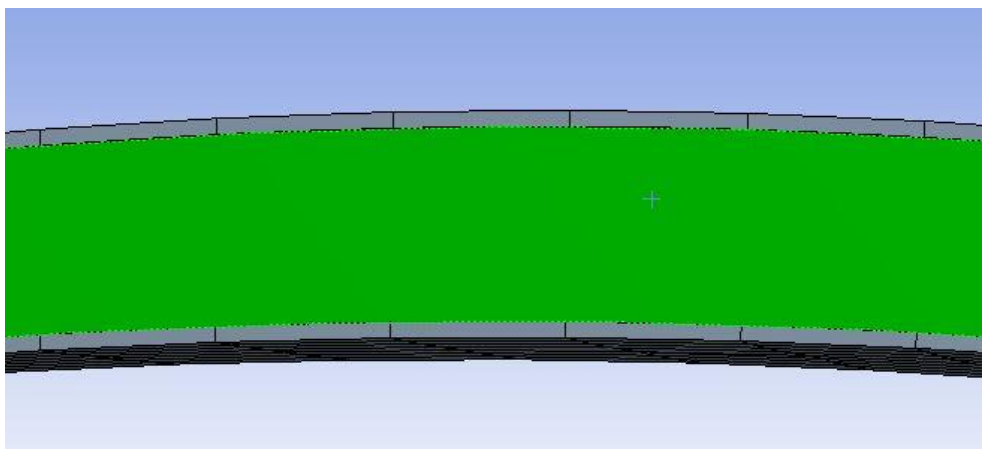


Kuva 26. Geometria Ansys Workbench:ssä.

Tämä geometria mallinnettiin siten, että täyttökerros mallinnettiin kuvan 25 mukaisella geometrialla ja pintakerrokset täyttökerroksen ympärille. Kennolevyrakenteen mallinnusta on esitetty kuvissa 27 ja 28.



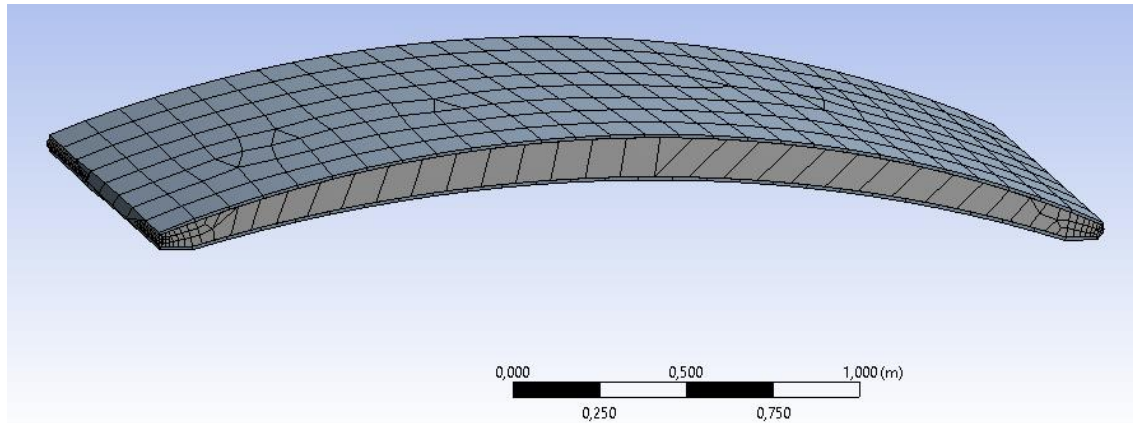
Kuva 27. Kennolevyrakenteen geometrian mallinnus.



Kuva 28. Pinta- ja ydinkerrosten mallinnusperiaate.

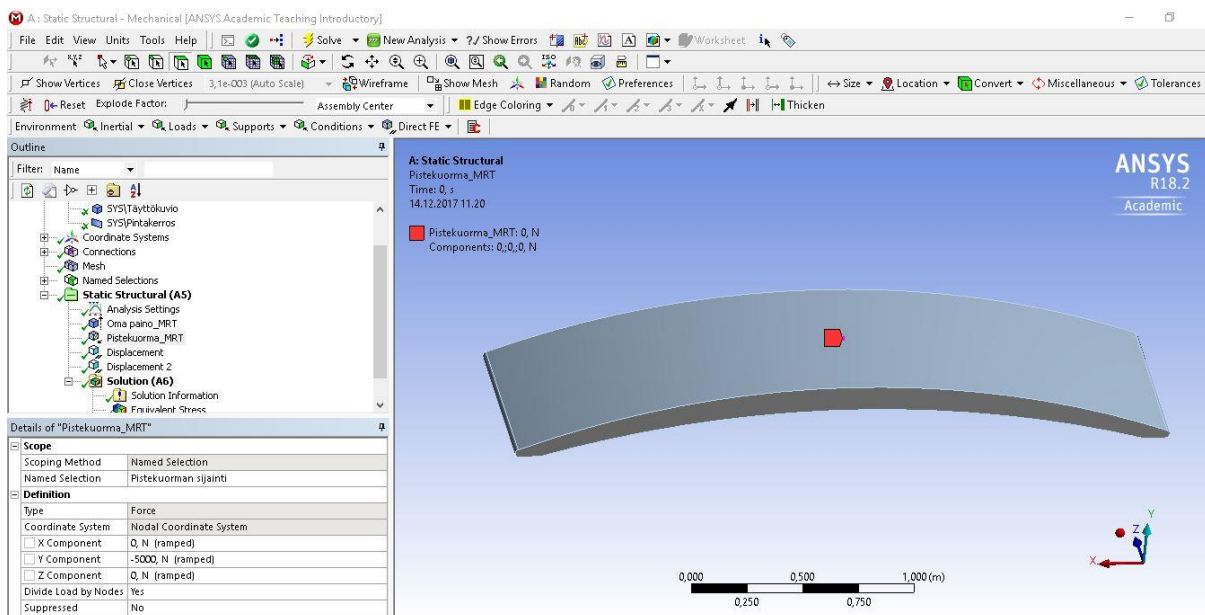
Kennolevyrakenteen mallinnuksessa pintakerrokset tulevat nyt kuvan 26 mukaisen geometrian päälle, joten geometria hieman poikkeaa suunnitellusta. Mallinnus oli kuitenkin hyvä ja toimiva yksinkertaistus tulevia laskentoja varten, joten kyseisillä yksinkertaistuksilla jatkettiin laskentaa. Ydinainekerros suunniteltiin kantamattomaksi joka tapauksessa, joten sen suurempaa mallintaminen ei vaikuta laskentatulokseen merkittävästi.

Seuraavaksi Ansyskseen syötettiin taulukon 6 mukaiset materiaaliominaisuudet ja luotiin elementtiverkko (kuva 29), jossa elementin kooksi valittiin noin 100 mm.



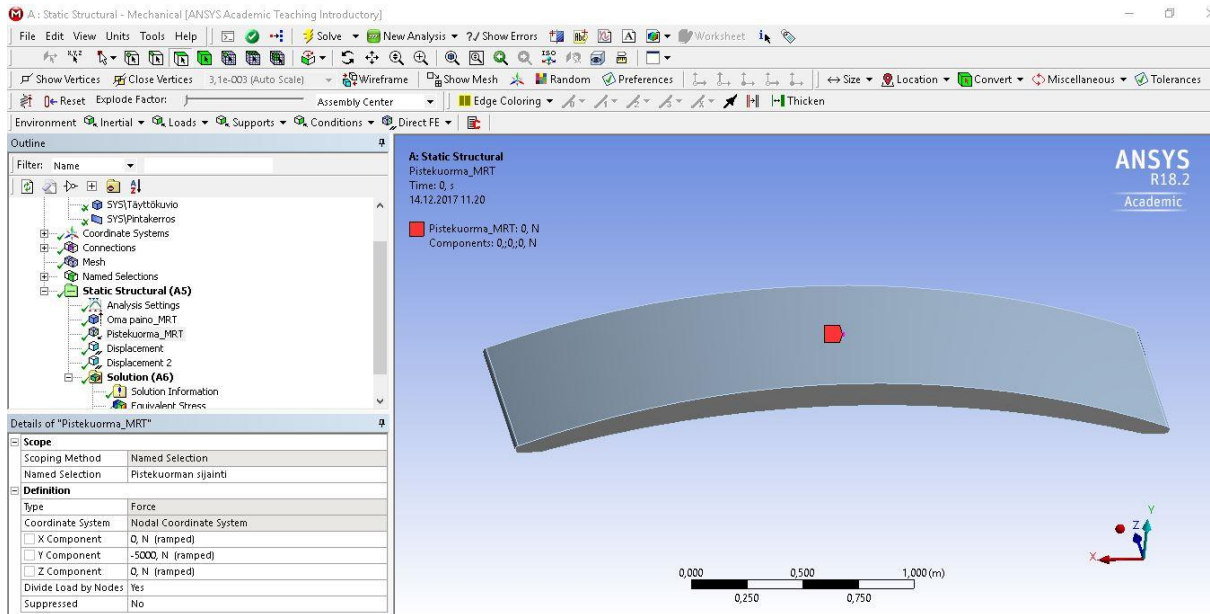
Kuva 29. Elementtiverkko.

Tämän jälkeen mallinnettiin keskelle kansilaattaa omat painot ominaisarvona (kuva 30).



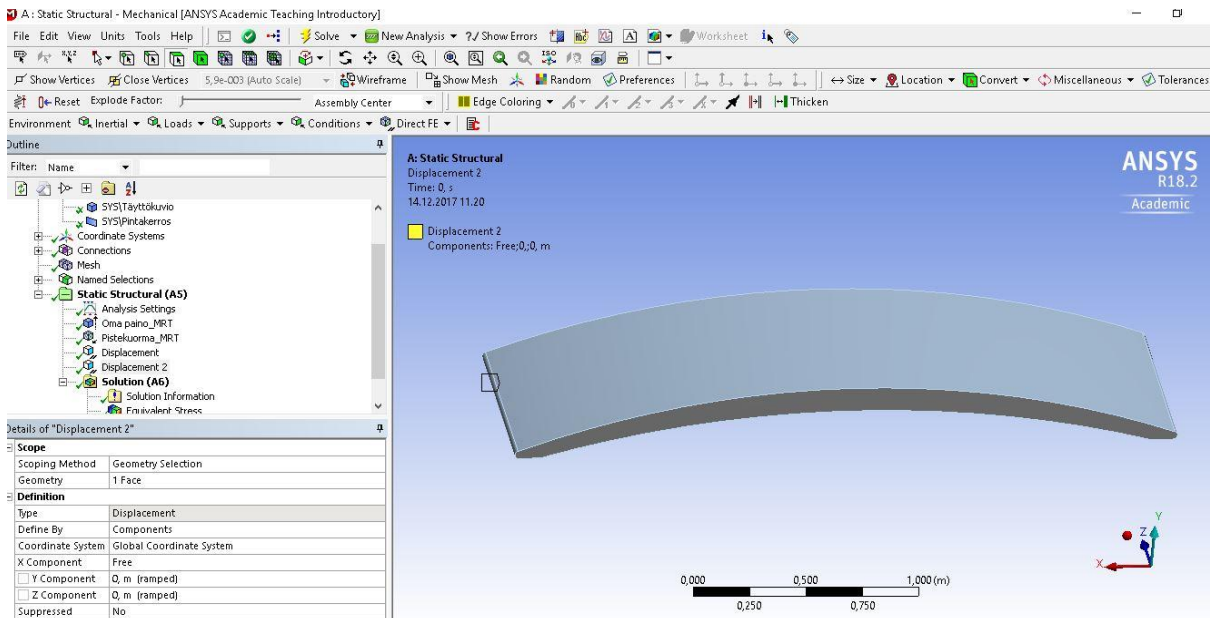
Kuva 30. Omat painot.

Pistekuorma (kuva 31) mallinnettiin murtorajatilassa alussa listattujen ehtojen mukaisesti, jolloin murtorajatilassa kuorman arvoksi tuli 500 kg eli 5000 N.



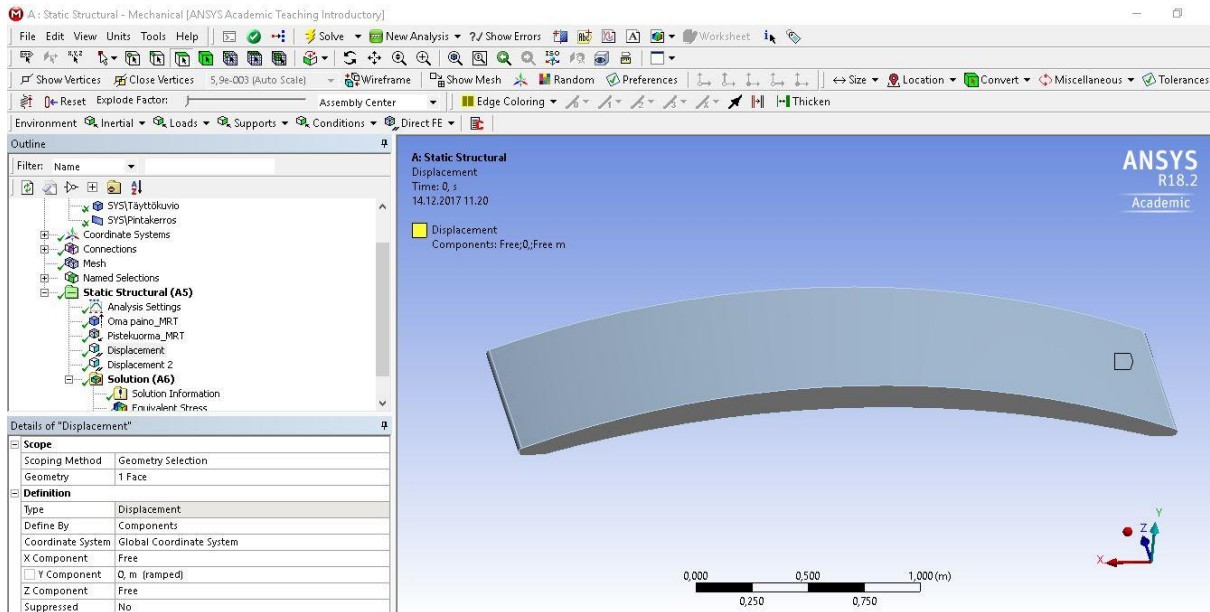
Kuva 31. Pistekuorma.

Laatta mallinnettiin nivelellisesti tuettuna molemmin puolin, vaikka lopullinen silta todennäköisesti tullaan kiinnittämään jäykästi, jolloin saadaan kaaren vaikutuksesta puristusjännitys hyödynnettyä ja syntyvää taivutusjännitystä pienennettyä. Vasemmalta puolelta (kuva 32) tuki mallinnettiin jäykkänä pysty- ja poikkisuuntaan. Tällöin kappale pääsee siirtymään ainoastaan pituussuuntaisesti.



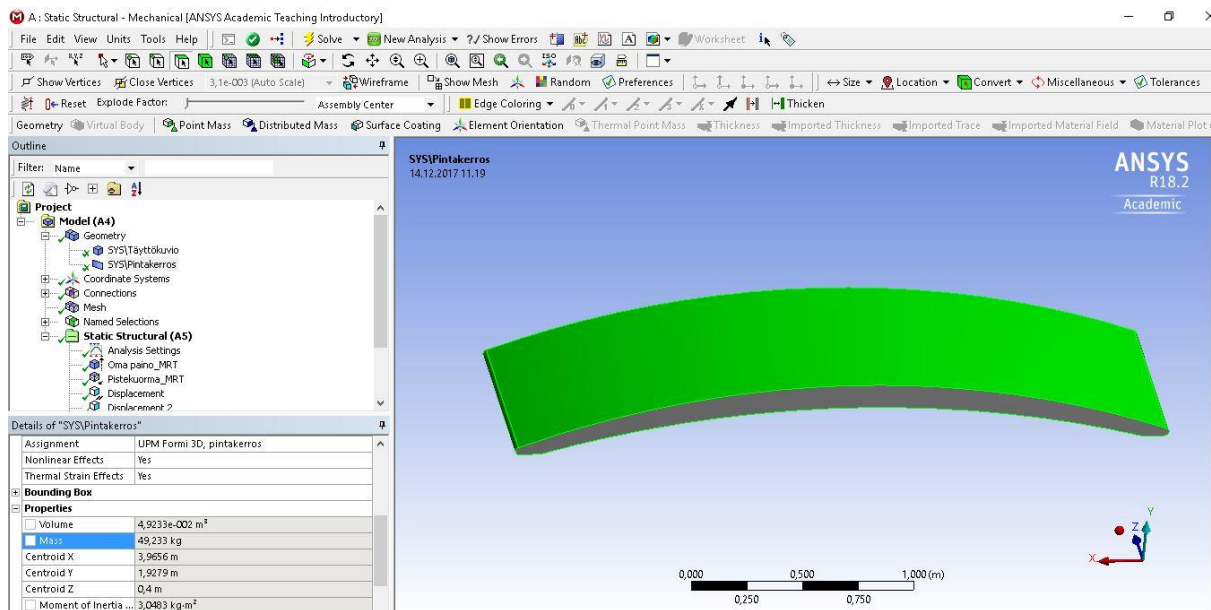
Kuva 32. Tuki vasemmalle puolella.

Oikealta puolelta (kuva 33) liike rajoitettiin ainoastaan pystysuuntaisesti. Tällöin liike sallittiin muihin suuntiin.



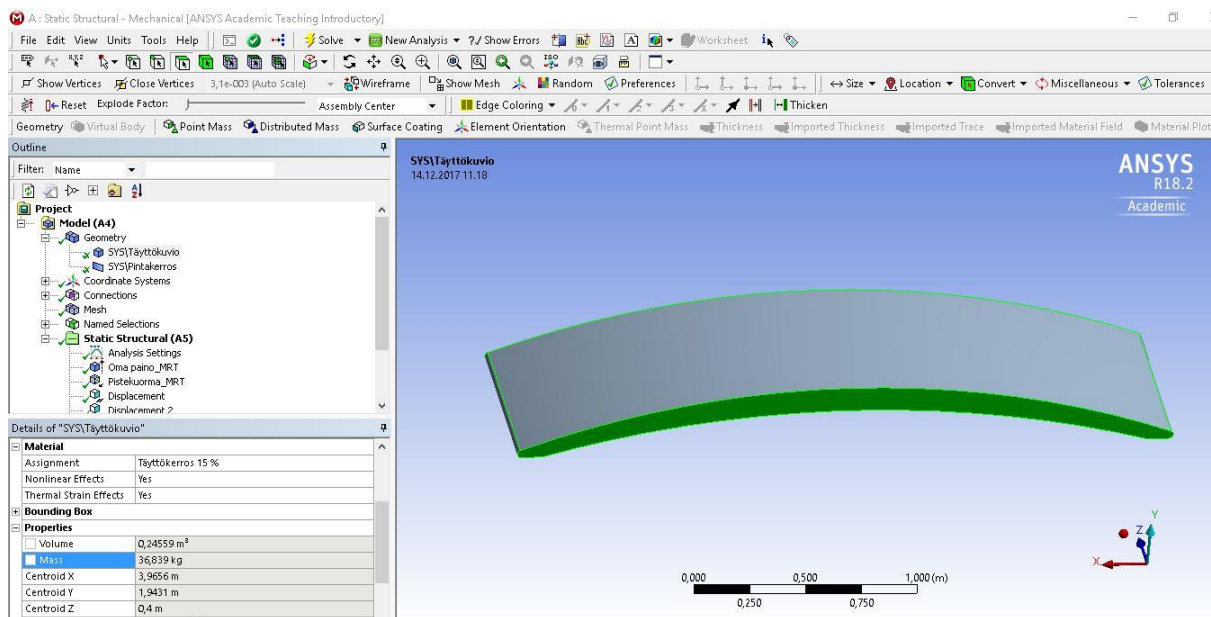
Kuva 33. Tuki oikealla puolella.

Seuraavaksi aloitettiin pinta- ja ydinainekerrosten geometrian mallintaminen laskentamalliin. Täyttökuvioiden sekä täyttöprosentin vaikutuksesta taivutuslujuuteen ei ole kirjallisuudessa selvyyttä. Tästä syystä päätettiin, että pintakerrokset mallinnettisiin FEM-ohjelmaan umpinaisina taulukon 6 mukaisilla lujuusominaisuuksilla ja täyttö mallinnettisiin myös umpinaisena, mutta pienellä jäykkyysominaisuudella. Täyttöprosentiksi arvioitiin alustavasti FEM-malliin 15 % ja taivutusjäykkyudeksi 1 MPa. Tällöin ydinaineen tiheydeksi tulee 15 % materiaalin umpinaisesta tiheydestä eli 150 kg/m^3 . Pintakerrosten paksuutta haettiin tekemällä muutama rasisustarkastelu eri pinta- ja täyttökerrosten paksuuksilla. Pintakerrokseksi valittiin lopullisesti 10 mm. Yksittäisiä filamentteja ei mallinnettu vaan yksinkertaistuksena ydin- ja pintakerrokset mallinnettiin jatkuvina yhtenäisinä rakenteina.



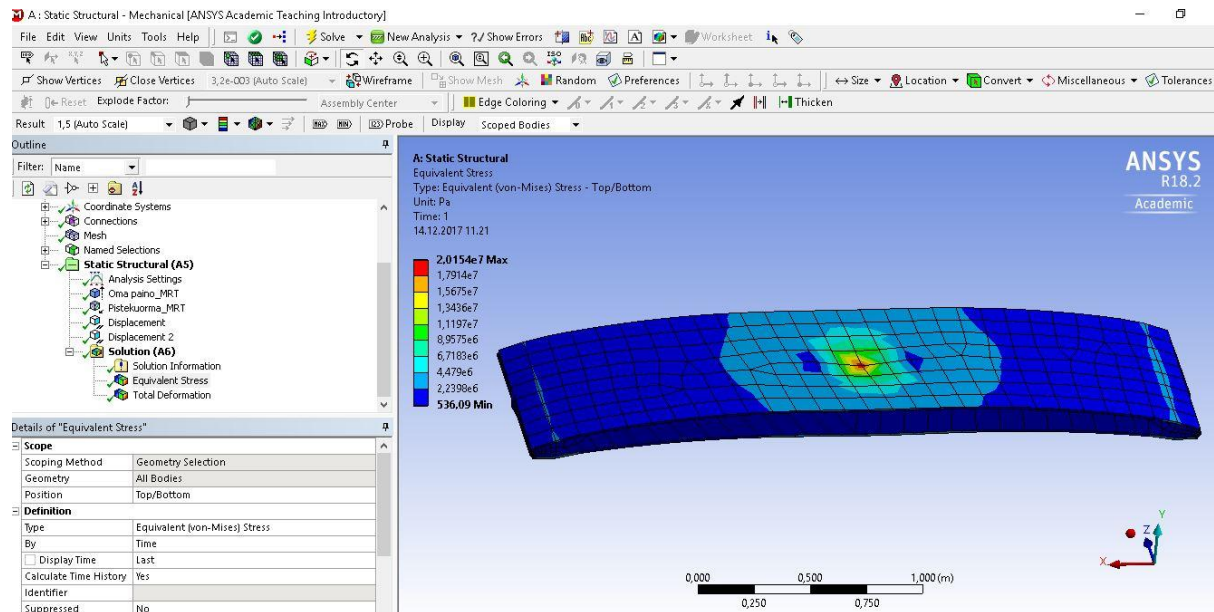
Kuva 34. Pintakerrosten mallinnus.

Pintakerrosten painoksi tuli 49 kg. Pintakerros kiertää ydinaineen ympärillä jatkuvana.



Kuva 35. Ydinaineen mallinnus.

Ydinaineen painoksi tuli 37 kg. Näin ollen yhteispaino koko kansilaattarakenteelle oli 86 kg. Geometrian, rasiusten ja tukien mallinnuksen jälkeen FEM-tarkastelussa selvitettiin syntyvä von-Mises-jännitys (kuva 36).



Kuva 36. von-Mises-jännitys.

Suurin taivutusjännityksen arvo on noin 20 MPa joka syntyy keskelle kansilaattaa. Jännitys on hyvin paikallinen kuorman luonteesta johtuen. Taivutuslujuuden ollessa 25 MPa, ollaan taivutuskestävyydessä 80 % käyttöasteella.

Pistekuorma aiheuttaa hyvin paikallisen jännityksen laattaan. Todellisessa tilanteessa kuorma jakautuu vähintään kosketuspinta-alalle eikä ole pistemäinen. Tämän tutkimuksen tarkastelua varten pistemäinen kuorma on kuitenkin riittävän tarkka approksimaatio.

5.3.2 Pienoismallin 3D-tulostus

Sillan suunnittelun pohjalta aloitettiin sillan pienoismallin 3D-tulostussuunnittelu. Pienoismallin tulostuksessa päätettiin valita mahdollisimman iso koko, jonka voisi tulostaa yhdessä osasta. Tavoitteena oli löytää iso 3D-tulostin, joka tulostaisi sillan kansilaatan pienoismallin yhdellä tulostuskerralla. Pienoismallin suunnitteluperusteet on listattu alla:

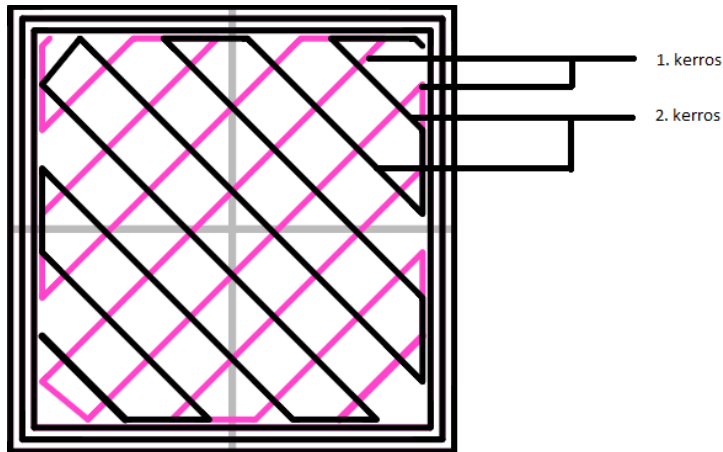
- **Pienoismallin 3D-tulostus ja toteutus**
 - Pitää ottaa huomioon sen tulostettavuus
 - Tulostetaan yhdestä osasta
 - Tulostetaan ainoastaan kantava kansilaatta
 - Tulostetaan mahdollisimman iso kappale
- **Pienoismallin 3D-tulostuksen DFAM-vapausasteet**
 - Tulostusaika maksimissaan 10 h
 - Tulostettavan kappaleen koko maksimissaan suurimman tulostusalan mukainen
 - Kappaletta ei voida tulostaa yli 45 asteen kulmassa ilman tukirakenteita
 - Tukirakenteiden käyttöä pyritään välttämään
 - Tulostus vahvimmassa suunnassa

TTY:llä toimiva avaruuskerho Castorin Megaprinter oli tutkimuksen tekohetkellä Tampereen suurin komposiittitulostin, jonka tulostusala (leveys, pituus, korkeus) on 500 x 500 x 1000 mm ja joka on tarkoitettu kerhoon kuuluvien jäsenten käytettäväksi tulostimeksi. Tulostimen ovat rakentaneet kerhon jäsenet itse ja se sijaitsee kerhon kerhohuoneessa. Tulostin toimii FDM-periaatteella ja siinä on lämmitettävä tulostinpeti.

Pienoismalli päätettiin 3D-tulostaa pituussuuntaisesti kyljellään. Tulostettaessa poikkisuuntaisesti taivutus valmiissa sillassa kohdistuisi kerrosten väliseen tartuntaan, jonka taivutuskestävyys on heikompi verrattaessa jatkuvan filamentin taivutuskestävyyteen. Sama ongelma tulisi kyseeseen, jos silta tulostettaisiin samassa asennossa, kuin se on lopullisesti. Tulostettaessa pituussuuntaisesti kyljellään, saadaan tulostuskerrokset jatkuvana pituussuuntaisesti, eli kanta-
van suunnan mukaisiksi.

Pituussuuntaisesti tulostettuna suurimman tulostettavan sivun mitta oli 500 mm. Pienoismallin tukireuna vaati kuitenkin tilaa, joten suurin mahdollinen tulostusmitta oli 450 mm. Suurin mit-takaava, jolla pienoismalli voitiin tulostaa, oli noin 1:6.7. Pienoismallin mallintamisessa skaa-lattiin sillan pinta- ja ydinkerroksen paksuudet, sekä muut mitat, jolloin saatiin pienoismallin pituudeksi 450 mm, leveydeksi 120 mm ja paksuudeksi keskeltä 18 mm. Ydinkerroksen pak-suudeksi tuli suunnitelman mukaan 15 mm ja pintakerroksien paksuuksiksi 1,5 mm.

Kirjallisuudessa on todettu vahvaksi täyttökuvioiksi Rectilinear- ja Honeycomb- täytöt (Horvath 2014). Täyttökuvioiksi valittiin Rectilinear, joka tulostaa joka toisen kerroksen 45 asteen kulmassa ja toisen kerroksen ensimmäisen päälle 90 asteen kulmassa toiseen suuntaan kuvan 37 mukaisesti.



Kuva 37. Rectilinear-täyttökuvio.

Rectilinear-täyttökuvio tulostuu pintakerrosten väliin, niin että vuoron perään kerroksittain tulostetaan kuvan 37 mukaisen esimerkin tavoin pintakerrosten kanssa 1. kerros ja toisella kerroksella 2. kerros. Näitä kerroksia toistetaan, kunnes saadaan 45 asteen kulmassa tulostettu ydinaine tulostettua pintakerrosten väliin kaikkialle. Muita täyttökuvioita on olemassa paljon ja lisää tulee ohjelmistopäivitysten mukana. Täyttökuvioiden käytössä voidaan pitää hyvänä puolena täytön tulostaman mallinnuksen poisjättäminen ennen sen 3D-tulostamista. Haluttu täyttö voidaan tulostaa suoraan ohjelman sisäisillä asetuksilla mallin viipaloinnin yhteydessä eikä sitä tarvitse erikseen tulostusmallintaa.

Ongelmana on rakennesuunnittelijan näkökulmasta täytön lujuuden arviointi. Rakennesuunnittelussa pitää voida todentaa suunniteltujen rakenteiden vahvuudet. Vielä ei 3D-tulostettujen rakenteiden lujuuslaskentaan ole sopivia työkaluja. FEM-laskentaan tarvitaan työkalu, joka optimoi materiaalia tai vaihtoehtoisesti laskee 3D-tulostuksessa käytettyjen täyttökuvioiden vahvuuksia olisi hyvä työkalu rakennesuunnittelijan näkökulmasta.

Rectilinear-täyttökuvion valitsemisen jälkeen asetettiin viipalointiohjelmaan loput tulostusasetukset. Tulostuksessa päätettiin aloittaa tietyillä hyviksi todetuilla asetuksilla ja muuttaa niitä tulostuksen aikana tai aloittaa kokonaan uudestaan tulostus virheiden tapahduttua. 3D-tulostamisessa harvoin päästään kerralla onnistuneeseen lopputulokseen, joten tulostamiseen ryhdyttäessä on hyvä tiedostaa menetelmään liittyvät epävarmuudet ja suunnitella ylimääräistä aikaa niiden mukaisesti. Osa tulostuksen tiedoista ja tulostuksessa käytetyistä asetuksista on listattu taulukkoon 8.

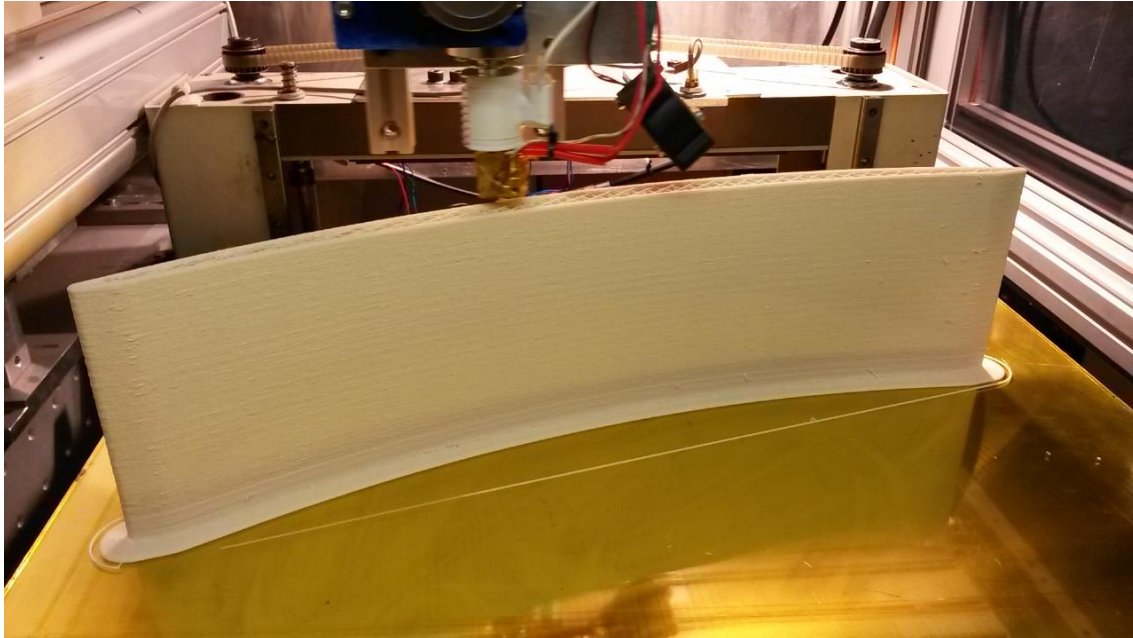
Taulukko 8. Pienoismallin 3D-tulostusasetukset.

Parametri	Arvo
Tulostuspäivämäärä	28.9.2017
Tulostussuunta	Pituussuuntaisesti kyljellään
Tulostuslämpötila [°C]	225
Tulostusalustan lämpötila [°C]	45
Tulostin	Castor / Megaprinter
Materiaali	UPM Formi 3D
Mittakaava	n. 1:6,7
Pienoismallin pituus [mm]	450
Pienoismallin leveys [mm]	120
Pienoismallin paksuus (keskeltä) [mm]	18
Pienoismallin paino [g]	376
Kerroskorkeus [mm]	0,5
Täyttökuvio	Rectilinear
Tukireunan paksuus (eng. brim) [mm]	15
Täyttöprosentti [%]	15
Suuttimen koko [mm]	0,8
Filamentin koko [mm]	1,75-2
Ensimmäisen kerroksen korkeus [mm]	0,8
Pintakerrosten määrä [kpl]	3
Tulostusnopeus [mm/s]	72
Tulostusaika [h]	4,5
Materiaalimenekki [m/cm ³]	166/400

Tulostuspäivämääräksi sovittiin Castor-kerhon kanssa 27.9.2017. Ennen tulostamista valmiiksi skaalatussa STL-tiedostomuodossa oleva malli ladattiin tulostimeen yhteydessä olevaan tietokoneeseen ja viipaloitiin luoden 3D-tulosteen G-koodin. Syntynyt G-koodi ajettiin läpi tulostimelle. Tulostusalustan lämmitettyä, tulostaminen alkoi käyttäjän hyväksyttyä tulostamisen aloittamisen.

Ensimmäinen tulostus toteutettiin ilman alustan esilämmitystä ja tukireunaa. Kappale ehti tulostua noin 50 mm ennen kuin irtosi alustastaan ja tulostus jouduttiin lopettamaan. Tulostusalustan lämmitys parantaa kappaleiden kiinnittymistä alustaan, joten toiseen tulostukseen alusta lämmitettiin 45 asteeseen ja lisättiin taulukon 8 mukainen tukireunan paksuus, jolla kappale saatiin pysymään kiinni tulostusalustassa. Tulostuslämpötila oli aluksi 220 °C astetta, jolloin tulostusjälki oli hieman rosoista. Materiaalikehittäjän mukaan lämpötilaa lisäämällä sai pinnan rosoisuutta vähennettyä, joten lämpötilaa nostettiin 225 °C asteeseen, jolloin tulostusjälki oli parempaa. Kappale tulostettiin ensimmäiset 20 mm normaalilla 45 mm/s tulostusno-

peudella. Tulostusnopeutta päätettiin lisätä, sillä täyttökuvion sillat tippuivat ja jäivät roikkumaan kerrosten välillä, jolloin täyttökuvion kerrokset eivät olleet täysin kiinni toisissaan. Tulostusnopeuden kerrannaista lisättiin kertoimella 1,6, jolloin saatiin lopulliseksi tulostusnopeudeksi $1,6 \times 45 \text{ mm/s} = 72 \text{ mm/s}$ ja täyttökuvion siltojen tippumista saatiin vähennettyä.

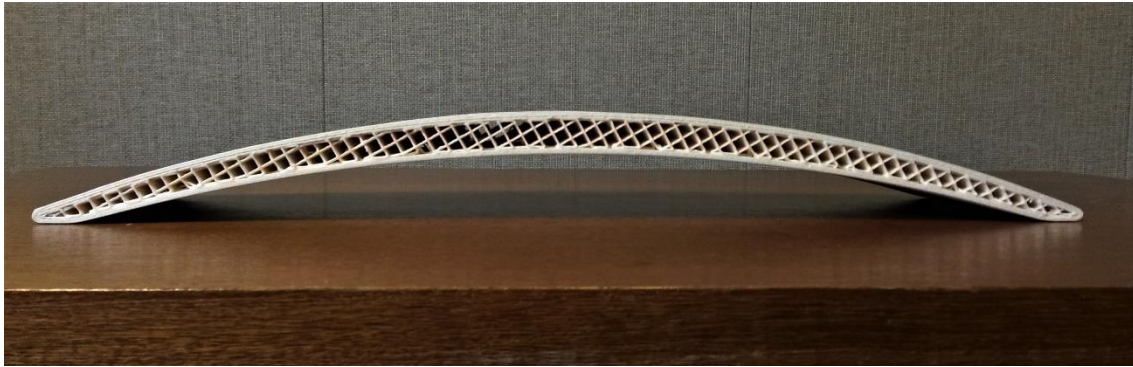


Kuva 38. Pienoismallin 3D-tulostus käynnissä Megaprinterillä.

Tulostuksen päätyttyä kappale irtosi helposti alustasta taivuttamalla kappaletta poikittaissuuntaan. Tukireuna poistettiin puukon avulla veistämällä. Ensimmäisiin kerroksiin muodostui epämääräistä karheaa pintaa, joka myös poistettiin veistämällä puukon avulla muutaman millimetrin paksuinen kerros kauttaaltaan ensimmäisestä kerroksesta pois. Lopuksi veistetty kappale hiottiin tasaiseksi (kuvat 39 ja 40).



Kuva 39. 3D-tulostettu ja jälkikäsitelty pienoismalli - viistosti.



Kuva 40. 3D-tulostettu ja jälkikäsitelty pienoismalli - sivukuva.

Pienoismallin pintakerroksen suunniteltu paksuus oli 1,5 mm. 3D-tulostuksen kerrospaksuudeksi valikoituu kuitenkin aina suutinkoon kerrannainen leveyssuunnassa ei tulostuskerroksen kerrannainen, niin kuin 3D-tulostettassa otaksuttiin. Tulostettaessa ylöspäin voidaan tulostuskerros valita halutun mukaiseksi, mutta nyt tulostettaessa pituussuuntaisesti tulostuskerroksen paksuus määräytyi suuttimen koon mukaisesti, mikä selvisi tulostuksen jälkeen.

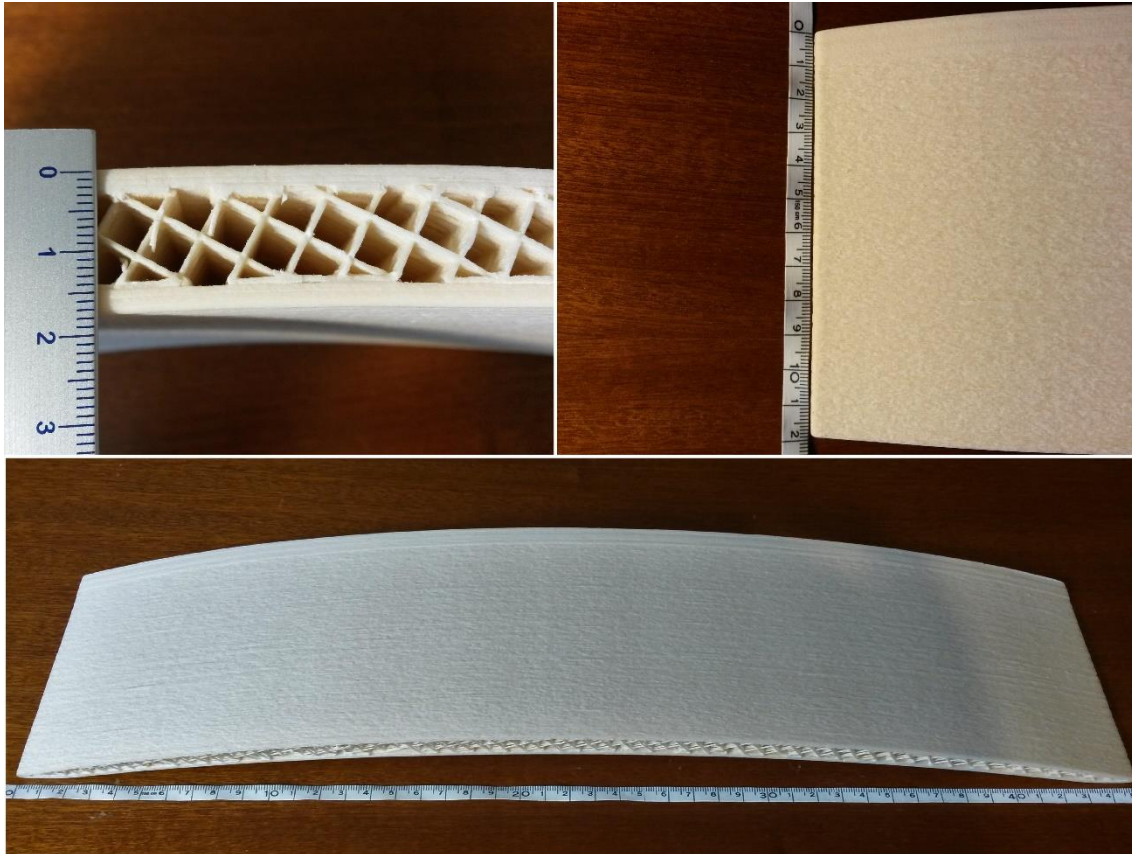
Pintakerroksia ollessa 3 kpl, poikkisuuntaisen pintakerrosten paksuudeksi olisi pitänyt tulla $3 \times 0,8 \text{ mm} = 2,4 \text{ mm}$, joka siis poikkeaa suunnitellusta 1,5 mm:n pintakerrospaksuudesta. Mittattu pintakerrosten paksuus oli kuitenkin 3 mm. Tämä lisäero 2,4 mm:stä 3 mm:iin saattaa johtua filamentin vaihtelevasta paksuudesta tai tulostetun kerroksen turpoamisesta. Myöhemmässä koekuormitusosiossa otettiin huomioon pienoismallin muuttunut geometria, jolloin vertailua varten luotuun laskentamalliin mallinnettiin toteutunut, ei suunniteltu geometria.

Pintakerroksista tuli sileitä ja ne tarttuivat hyvin toisiinsa. Rectilinear- täyttökuvion huomattiin jättävän kerrokset irti toisistaan, sillä kuten kuvasta 41 huomaa, kerrokset eivät tulostu suoraan kiinni toistensa päälle vaan kuvan 37 mukaisesti vuorotellen 45 asteen kulmassa.



Kuva 41. Täyttökuvio 3D-tulostetussa pienoismallissa.

Lähikuvasta 41 on täyttökuvion siltojen lisäksi havaittavissa pintakerrosten lukumäärä (3 kpl). Ydinaineen kerrokset koostuvat yksittäisistä filamenttikerroksista. Pienoismallin mittoja on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Pienoismallin mitat.

Pienoismalli oli paksuudeltaan ja pituudeltaan suunnitellun mukainen. Leveys lyheni jälkikäsittelyn myötä muutaman millimetrin. Lopullisen pienoismallin painoksi tuli jälkikäsittelyn jälkeen 376 g. Siihen kului 166 m filamenttilankaa, joka on noin puolet yhdessä filamenttikellessä olevasta materiaalista. Suhteellisen ison kappaleen 3D-tulostamiseen meni vain 4,5 tuntia, joka on isommalle tulosteelle pieni aika.

5.3.3 Pienoismallin koekuormitus

Kuormitus suoritettiin kolmipistetaivutuskokeena (kuva 43), jossa kappale pääsi liikkumaan vapaasti pituussuuntaisesti. Kuormaa jaettiin koko mallin leveydelle.



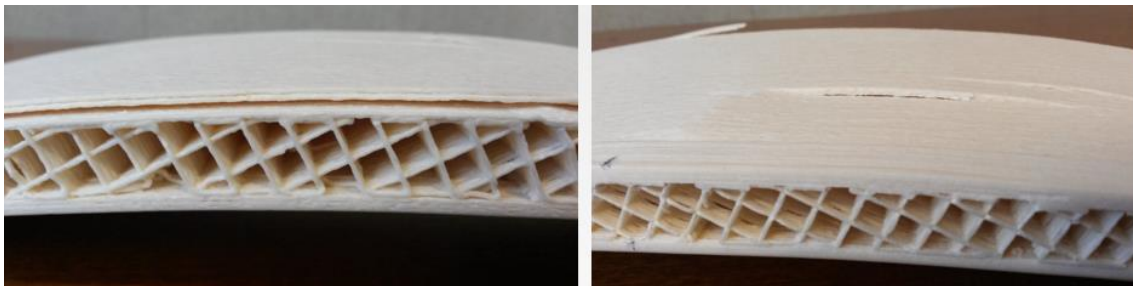
Kuva 43. Koekuormitusjärjestely.

Kuormitustilanteessa mitattiin kuormaa siirtymän funktiona. Mittauspiste oli sillan keskellä, kuormituksen kohdalla. Kuormitusta lisättiin asteittain murtokuormaan asti. Kuormitus pysäytettiin murtotilanteessa, mentäessä epälineaariselle alueelle kuormituksessa.

Koekuormitustilanteessa pienoismalli oli kuvan 38 mukaisesti sileää alustaa vasten, jolloin kappale pääsi myös taipumaan pituussuuntaisesti. Pinnasta aiheutuu kuitenkin pieni kitka, jonka vaikutus on positiivinen pienoismallin taivutukselle. Tällöin myös murtokuormasta tulee hieman suurempi kuin järjestettäessä kuormitustilanteessa mallin toiseen päähän liikkuva laakeri, sillä kitka aiheuttaa hieman puristusta kappaleen päissä.

Pienempi silta voitaisiin kuitenkin toteuttaa jäykällä kiinnityksellä molemmista päistä, jolloin taivutuskestävyydessä saataisiin puristava vaikutus taivutuslujuuteen hyödynnettyä. Tästä syystä, pienoismallin koekuormituksessa sallittiin pieni kitkan positiivinen vaikutus taivutusmurtokestävyyteen.

Malli murtui 547 N suuruisella kuormalla, joka vastaa noin 55 kg (liite B). Murtumistapa oli leikkausmurtuminen kahden yläpuolisen pintakerrosten leikkautuessa irti kolmannesta (kuva 44).

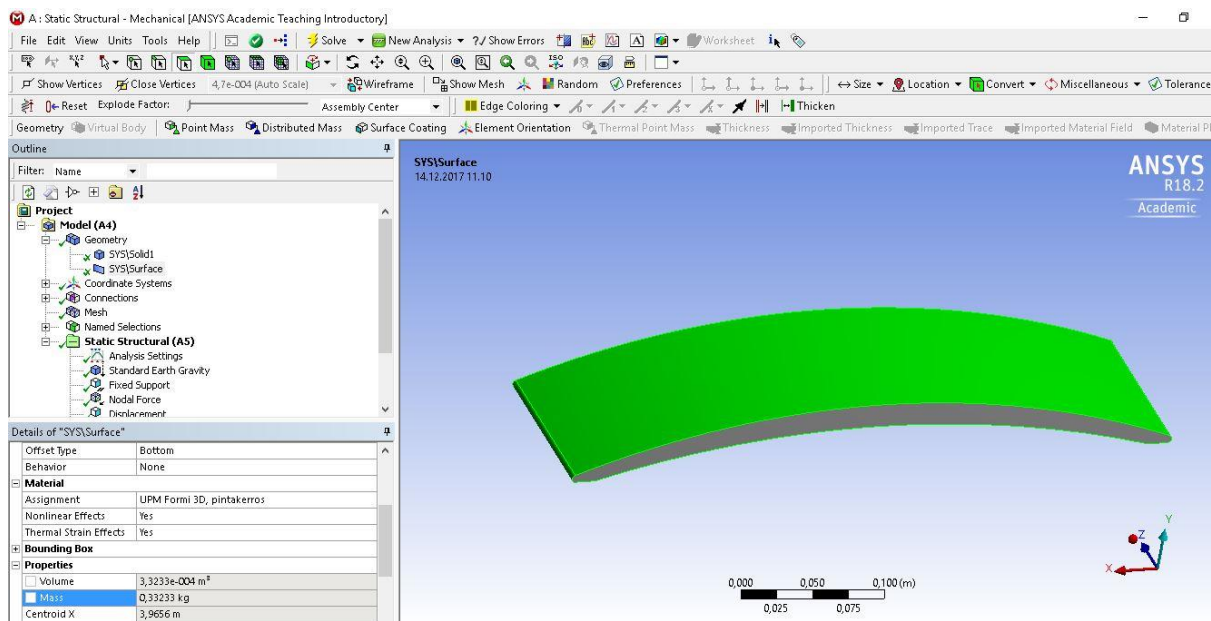


Kuva 44. Murtumispinta.

Kuormitus pysäytettiin leikkausmurtumisen jälkeen. Kuormitus oli hauras, sillä malli rikkoon-
tui yhtäkkisesti. Kappale oli taipunut murtumistilanteeseen mennessä noin 18,4 mm.

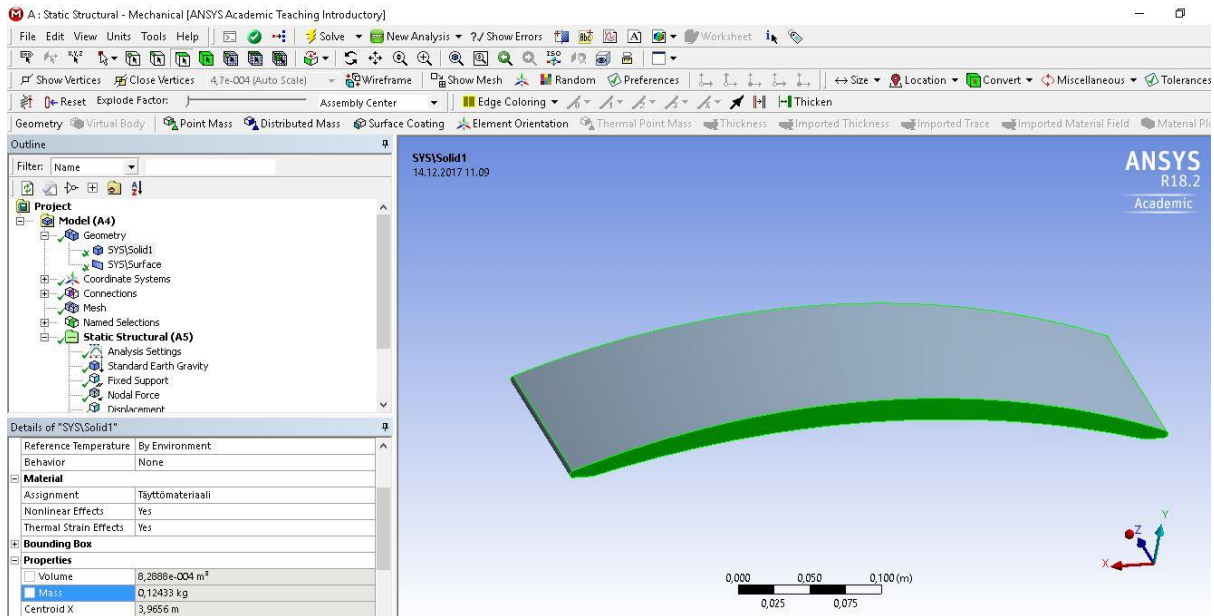
5.3.4 Pienoismallin laskentamallin vertaaminen koekuormitustulok- seen

Pienoismallin kennolevyrakenteen mallinnuksessa edettiin samalla tavalla kuin sillan lasken-
tamallin tapauksessa. Samoja suunnitteluperiaatteita käytettiin kennolevyrakenteen mallinta-
misessa ja myös samoja materiaaliparametreja. Mallinnuksessa saatiin pintakerrosten (kuva
45) painoksi 330 g.



Kuva 45. Pienoismallin pintakerrosten mallinnus.

Ydinaineen (kuva 46) painoksi tuli 120 g.

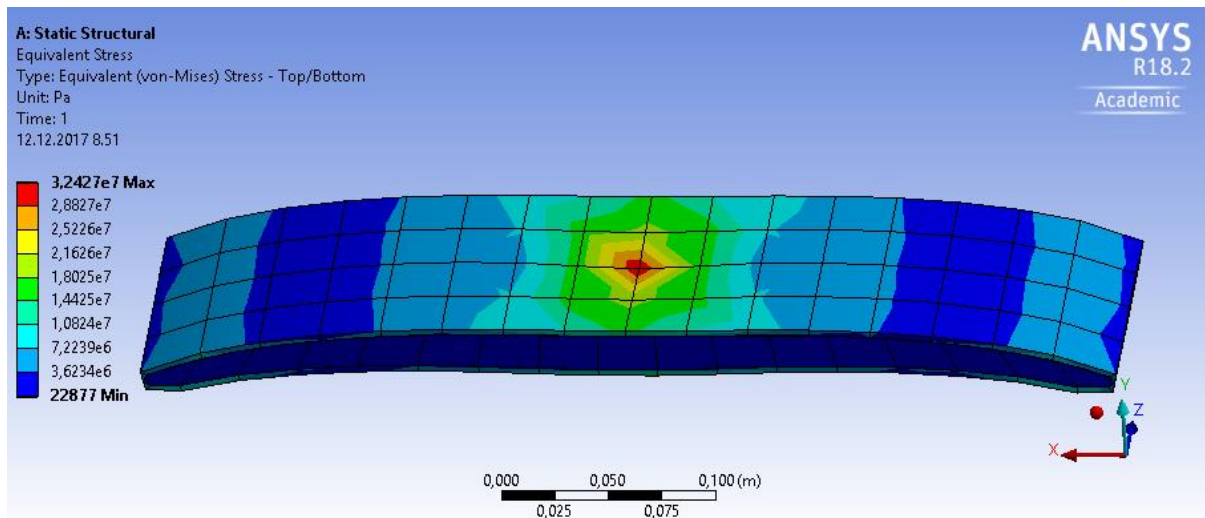


Kuva 46. Pienoismallin ydinaineen mallinnus.

Yhteispainoksi tuli noin 450 g. Pienoismallin todellinen paino oli 367 g, jolloin eroa painossa on noin 80 g. Ero selittyy mallinnusperiaatteella, joista on kerrottu kuvissa 24-27. Lisäksi ero voi johtua materiaalin epätasaisesta paksuudesta.

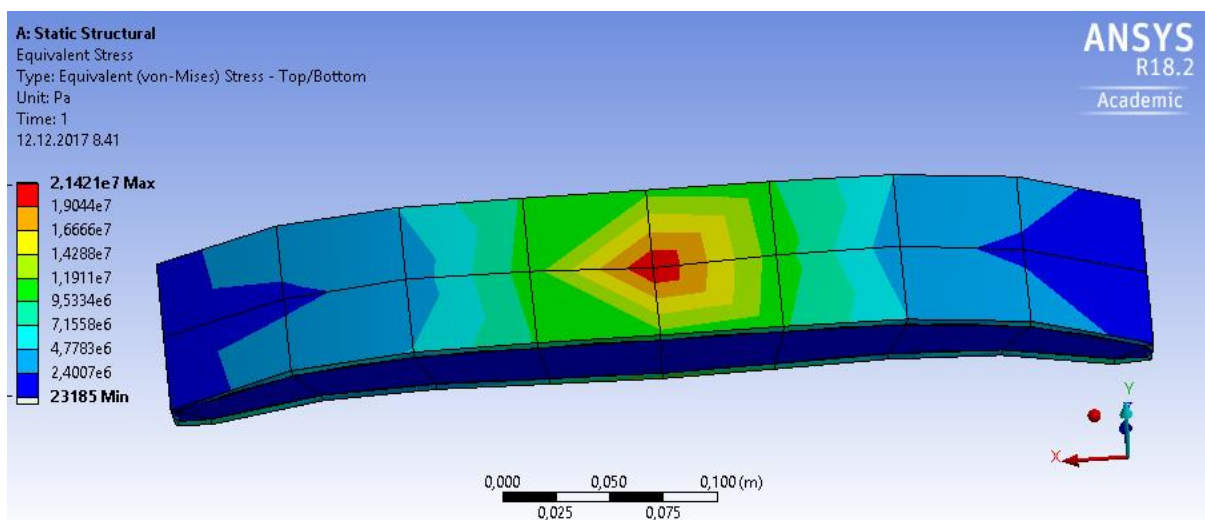
Laskentamallin tulosten vertailussa koekuormitustulokseen edettiin niin, että laskentamallissa pyrittiin luomaan koekuormitusta vastaava tilanne, jolloin voitiin tarkastella, millaisia taivutusjännityksiä kyseinen koekuormitus aiheuttaa laskentamallissa ja vastaako koekuormitus laskentamallista saatua tulosta. Saatua laskentamallin taivutusjännitystä voitiin tämän jälkeen verrata kappaleen taivutuslujuuteen.

Koekuormituksessa murtokuorma oli noin 547 N. Laskentamalliin mallinnettiin 550 N kuorma ja tarkasteltiin syntyvää taivutusjännitystä kahdella erilaisella elementtijaolla, sillä syntyvät jännitykset riippuvat käytetystä elementtijaosta.



Kuva 47. Taivutusjännitys 28 mm elementtijaolla.

Elementtikoon ollessa 28 mm (kuva 47), suurin taivutusjännitys syntyi pistekuorman kohdalle ja sen arvo oli 32 MPa.



Kuva 48. Taivutusjännitys 56 mm elementtijaolla.

Elementtikoon ollessa 56 mm (kuva 48), suurin taivutusjännitys syntyi pistekuorman kohdalle ja sen arvo oli 21 MPa. Eroa taivutusjännityksissä oli 11 MPa eri elementtikoolla. Yhteenveto tuloksista on koottu taulukkoon 9.

Taulukko 9. Koekuormitustulosten vertailu laskentamallin tulosten kanssa.

Ominaisuus	Arvo
Murtokuorma	547 N
Materiaalin taivutuslujuus	25 MPa
Taivutusjännitys murtokuormalla (28 mm)	31 MPa
Taivutusjännitys murtokuormalla (56 mm)	20 MPa

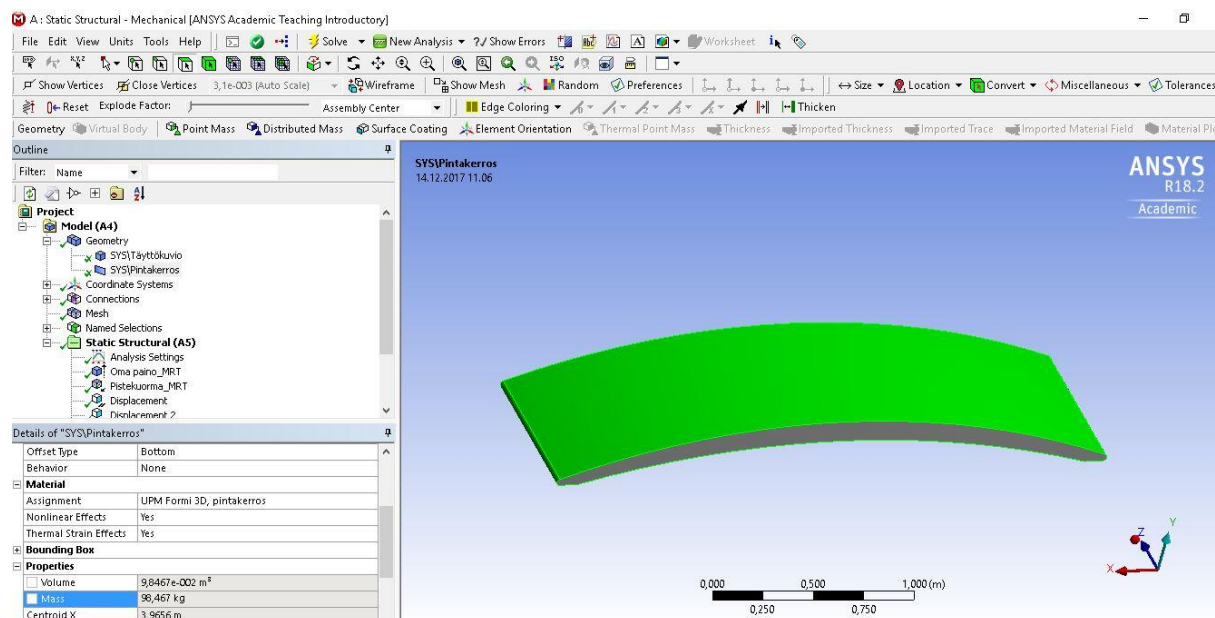
Laskentamalleissa päästiin murtokuorman arvolla lähelle materiaalin todellista taivutuslujuutta. Todellinen murtokuorma ei ollut kuitenkaan pistemäinen vaan se jaettiin koko leveyden matkalle niin kuin näkyy kuvassa 43. Murtotapa ei myöskään ollut taivutusmurto vaan kaksi yläpuolisista pintakerroksista leikkautuivat alimmasta irti, kuten näkyi kuvassa 44. Murtotapa oli siis pintakerrosten välinen leikkausmurto ja materiaalin täyttä taivutuskapasiteettia ei saavutettu.

Leikkauskestävyyttä voidaan parantaa rakentamalla sillan molemmat päät tuettuina (jäykällä kiinnityksellä), jolloin kappale ei pääse taipumaan pituussuuntaisesti. Tällöin myös taivutuskestävyys paranee, sillä kappaleessa voidaan hyödyntää syntyvän puristusvoiman vaikutus, joka syntyy kappaleen estetystä muodonmuutoksesta.

Leikkauskestävyyttä ei tutkittu eikä yksittäisiä filamenttikerroksia mallinnettu laskentamalliin. Tarkempaan tutkimustulokseen päästäisiin mallintamalla kaikki yksittäiset filamenttikerrokset, täyttö sellaisena kuin se todellisuudessa on oikeilla materiaaliparametreilla ja mallintamalla kuormitus samanlaisena kuin se koekuormitustilanteessa on.

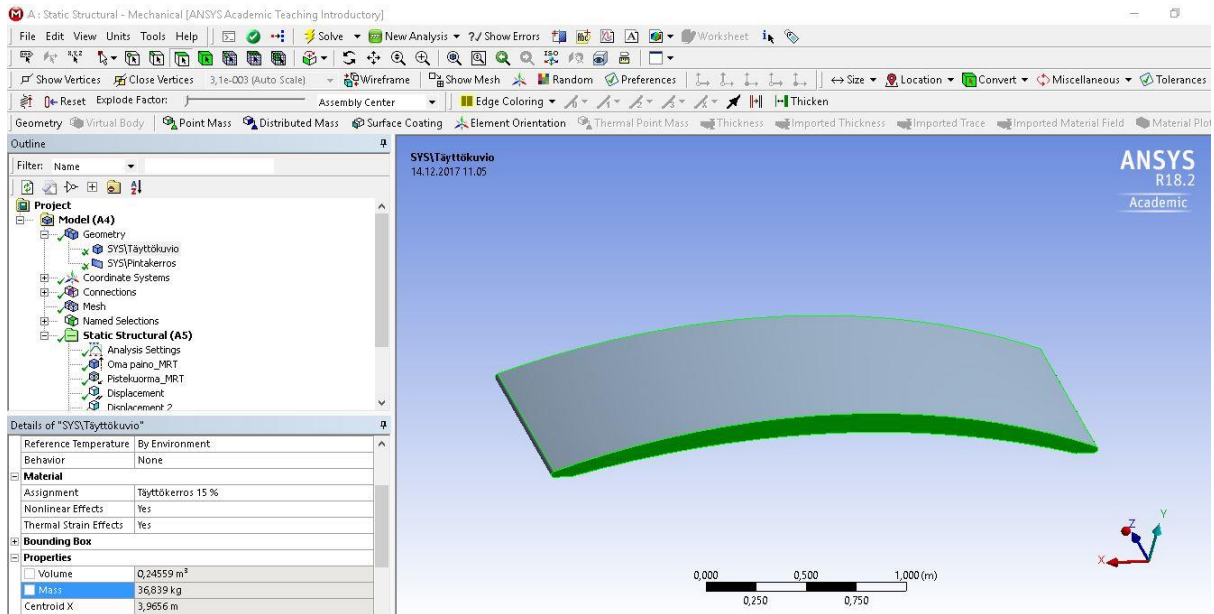
5.3.5 Sillan laskentamallin päivittäminen

Lopuksi suunnittelutyössä päivitettiin sillan alkuperäinen laskentamalli vastaamaan toteutuneen pienoismallin skaalattua kokoa. silta mallinnettiin alun perin 10 mm paksulla pintakerroksella ja 100 mm paksulla ydinainekerroksella. Toteutuneen pienoismallin vastaavien lukujen ollessa 3 mm ja 12 mm, tuli sillan päivitetyn mallin vastaaviksi luvuiksi 20 mm ja 80 mm.



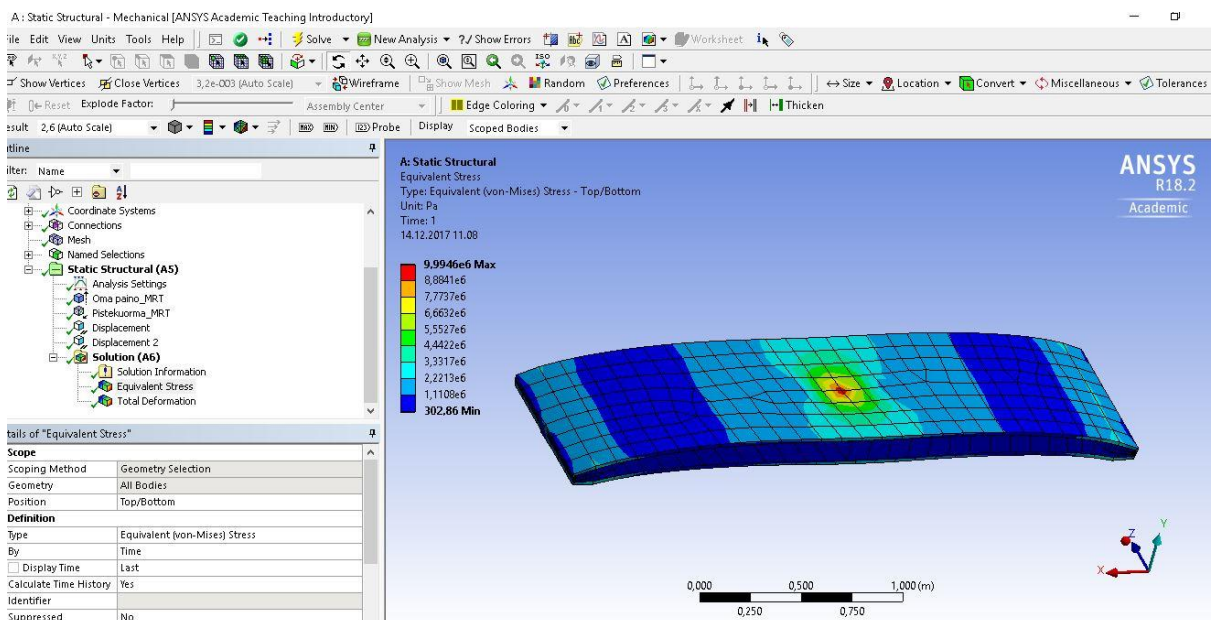
Kuva 49. Pintakerrosten mallinnus.

Pintakerrosten painoksi tuli päivitetyllä sillalla 98 kg. Pintakerrokset kiertävät ydinainetta molemmin puolin.



Kuva 50. Ydinaineen mallinnus.

Ydinaineen painoksi tuli 37 kg. Ydinaineen massa ei siis muuttunut sillan alkuperäisestä ydinaineen massasta. Tämä ero johtuu mallinnusperiaatteista. Ydinaineen geometria oli edelleen sama. Se ulottui 120 mm paksuudelle kansilaatan keskeltä mitattuna. Nyt ainoastaan pintakerroksen geometria muuttui. Näin ollen yhteispaino koko kansilaattarakenteelle oli 135 kg. Suurin taivutusjännityksen arvo (kuva 51) on noin 10 MPa, joka on puolet alkuperäisen laskentamallin taivutusjännityksestä.



Kuva 51. von-Mises-jännitys päivitetystä sillan laskentamallissa.

Tämä tulos on looginen, sillä sillan jälkimmäisessä laskentamallissa pintakerroksen paksuus kaksinkertaistui verrattuna alkuperäiseen laskentamalliin ja ydinaineen jäykkyyden ollessa 1 MPa, vain pintakerrokset toimivat kantavina. Näin ollen pintakerrosten paksuuden kaksinkertaistuessa ja kuormituksen pysyessä samana taivutusjännitys puolittui. Toteutuneen pienoismallin mukaan skaalatussa sillassa syntyy teoreettisesti siis 500 kg eli 5 kN pistemäisellä suunnittelukuormalla 10 MPa suuruinen taivutusjännitys.

6. YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli 3D-tulostaa kevyen liikenteen sillan pienoismalli, jossa toteutuu määrättyt lujuustavoitteet ja jossa saadaan uuden menetelmän avulla hyötyarvoja suunnitteluun. Tutkimusmetodeina käytettiin FEM-mallinnusta, rasituskokeita ja 3D-tulostetun sillan pienoismallin koekuormitusta laboratoriossa. Tutkimus oli rajoiksista huolimatta hyvin laaja ja vaati muun muassa lujuusoppia, sillansuunnittelua, 3D-tulostussuunnittelua, materiaalioppia, mallinnusta ja koekuormitustilaisuuden järjestämistä.

Tutkimuksen tavoitteet täyttyivät lukuisista haasteista huolimatta kuitenkin hyvin, sillä tutkimuksen aikana saatiin luotua 3D-tulostettu luja rakenne, joka osoittautui koekuormitustulosten perusteella vahvaksi. Myös hyötyarvot täyttyivät, sillä 3D-tulostamalla saatiin aikaiseksi kennolevyrakenne, joka perinteisellä menetelmällä olisi hyvin hankala tai lähes mahdoton toteuttaa. 3D-tulostuksessa ilmeni paljon haasteita, jotka havaittiin tulostamisen myötä. Tutkimuksen edetessä ongelmakohtia pyrittiin ratkaisemaan ja onnistuneita korjaustapoja käytettiin seuraavien mallien suunnittelussa ja 3D-tulostamisessa. Ongelmia ja niiden korjaustapoja on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Yhteenvetotaulukko tulostusongelmista ja korjaustavoista.

Ongelma	Korjaustapa
Kappale irtoaa tulostusalustasta	<ul style="list-style-type: none"> - Lisätään tukireuna kappaleen ympärille - Paksunnetaan tukireunaa - Tulostusalustan lämmitys - Tulostetaan ensimmäinen kerros paksumpana - Tulostetaan eri suunnassa
Kappale käyristyy jäähtyessään ja irtoaa toiselta puolelta tulostusalustasta	<ul style="list-style-type: none"> - Lisätään tukireuna kappaleen ympärille - Paksunnetaan tukireunaa - Tulostusalustan lämmitys - Tulostetaan ensimmäinen kerros paksumpana - Tulostetaan kappale pienempänä
Kappaleen pintaan jää epätasaisia jälkiä	<ul style="list-style-type: none"> - Muutetaan tulostusasetuksia - Hiotaan pinta tasaiseksi
Täyttökuvio tippuu kerrosten välillä	<ul style="list-style-type: none"> - Muutetaan tulostusasetuksia - Valitaan eri täyttökuvio - Muutetaan täyttöprosenttia

Täyttökuviona käytetty Rectilinear ei ollut paras mahdollinen, sillä se jätti rakoja kerrosten väliin. Tämä otetaan huomioon jatkosuunnittelussa ja pyritään luomaan vahvempia kuvioita paremmalla kestävyydellä. Kennolevyrakenteen tulostuksessa päästään parempaan kestävyys-teen jatkuvalla täyttökuvioilla, joka ei jätä välejä kerrosten välille. Lisäoptimointina voitaisiin tulostaa ydinaine laittamalla materiaalia vain syntyvien jännitystilojen mukaisesti. Silta kantaa pituussuuntaisesti, joten laippojen väleihin voisi 3D-tulostaa pituussuuntaisia uumia välittämään kuormaa. Tällöin siltarakenteesta voitaisiin saada vielä kevyempi. Täyttökuvion suunnittelua jatketaan tämän tutkimuksen päätyttyä.

Tutkimus osoitti, että suunnittelu komposiittirakenteiselle 3D-tulostetulle sillalle on hyvin uutta ja käytännössä 3D-tulostettuja siltahankkeita ei maailmassa juuri ole vielä toteutettu. Suunnitteluohjeiden sekä standardien puuttuminen aiheuttavat suunnitteluun paljon soveltamista. Tästä syystä sarjatuotanto 3D-tulostetuille silloille sekä menetelmän standardisointi vaativat paljon lisää tutkimusta tulostukseen käytettävistä materiaaleista, 3D-tulostusasetuksista kuten eri täyttökuvioiden ja täyttöprosenttien asetuksista sekä tutkimustyötä isojen kappaleiden sarjatuotantoa varten.

Tutkimuksen perusteella suositukset suunnittelijoille on mallinnuksen opettelu sekä tulostustekniikkaan tutustuminen. 3D-tulostaminen vaatii tietokoneavusteisen 3D-suunnittelun ja -mallinnuksen hallitsemista. 3D-tulostamisesta järjestetään kursseja ja seminaareja, joista saa hyvän pohjan tulostamiselle. Tampereen teknillisessä yliopistossa on opiskelijoiden käytössä olevia 3D-tulostimia, joihin voi ilmaiseksi käydä tutustumassa. Suosituksina tutkijoille on FEM-ohjelmiin lisäosa, jolla voisi tehokkaammin suunnitella 3D-tulostettavia osia. Tämän lisäksi tulostusmateriaalit, täyttökuviot ja -prosentit, tulostussuunnat sekä muiden tulostusasetuksien vaikutukset lujuuteen vaativat jatkotutkimuksia.

Tutkimuksen tuloksia esitettiin rakennusinsinööriliiton kerran vuodessa järjestämällä siltapäivillä 16.11.2017, jossa kerrottiin työn taustasta, tärkeimmistä saavutuksista sekä esiteltiin 3D-tulostettua pienoismallia. Nykyisellään olemassa oleva tekniikka soveltuu hyvin pienien kappaleiden valmistamiseen, mutta isojen rakenteiden 3D-tulostus vaatii paljon lisää tutkimustyötä. Projekti jatkuu ja jatkossa tullaan selvittämään isompien siltarakenteiden 3D-tulostusmahdollisuutta. Isommissa siltarakenteissa pyritään jäljittelemään luonnon rakenteita (biomiikka) suunnittelussa. Tämä tehdään luomalla entistä enemmän massaltaan optimoituja rakenteita, jossa materiaalia suunnitellaan rasiittuihin kohtiin ja poistetaan tarpeettomista kohdista. Kappaleen muodoista pyritään tekemään epäsymmetrisiä, jolloin saadaan jäykempiä rakenteita luotua.

7. LÄHTEET

P.B. Potyrala (2011), Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures, Katalonian polytekninen yliopisto (UPC), 93 s. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/100730182/Use-of-Fibre-Reinforced-Polymer-Composites-in-Bridge-Construction-State-of-the-Art-in-Hybrid-and-All-Composite-Structures>

M. Saarikivi, J. Handelberg, T. Holmberg, A. Matilainen (2008), Selvitys lujitemuovikomposiittituotteiden mahdollisuuksista rakennusteollisuudessa, Helsingin kauppakorkeakoulu, 49 s. Saatavissa: pyk2.aalto.fi/julkaisut/n-sarja/N-82_Julkaisun_e-versio.pdf

L.J. Broutman, R.H. Krock (1967), Modern composite materials, Addison-Wesley Publishing company, 581 s. Saatavissa: Tampereen Teknillisen yliopiston kirjasto

R. Nicholls (1976), Composite construction materials handbook, rakennustekniikan laitos, Delaweren yliopisto, 580 s. Saatavissa: Tampereen Teknillisen yliopiston kirjasto

A. Ajdukiewicz, B. Kotala, M. Weglorz (2009), Application of non-metallic fabrics as reinforcement in thin-walled precast concrete members, Architecture civil engineering environment, The Silesian University of Technology No. 2/2009, Saatavissa: <http://acee-journal.pl/cmd.php?cmd=download&id=dbitem:article:id=78&field=fullpdf>

E. Tuhola & K. Viitanen (2008), 3D-mallintaminen suunnittelun apuvälineenä, Tammermekaniikka, 175 s. Saatavissa: Tampereen Teknillisen yliopiston kirjasto

J. Horvath (2014), Mastering 3D Printing, Apress, 224 s. Saatavissa: Tampereen Teknillisen yliopiston kirjasto

J. Pekkala (2015), 3D-laserkeilausaineiston hyödyntäminen inframallintamisen yhteydessä ja sen lopputuotteen laadun varmistaminen, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 58/2015, Liikennevirasto, 90 s. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2015-58_3d-laserkeilausaineiston_web.pdf

M. Szilvasi-Nagy, Gy. Matyasi (2003), Analysis of STL Files, Mathematical and Computer Modelling vol.38, Issues 7-9, 945-960 s. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)90079-3)

M. Vaezi, H. Seitz, S. Yang (2011), A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol.67, 1721-1754 s. Saatavissa TTY:n tunnuksilla: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-012-4605-2>

S. Chekurov, P. Eklund, V. Kujanpää, J. Pekkarinen, K. Syrjä, J. Vihinen (2017), 3D-tulostuksen suunnittelu- ja päätöksenteko-opas yrityksille, DIMECC Result publications 1/2017.

Saatavissa: https://teknologiainfo.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/DIMECC_3D_tulostuksen_suunnittelu_ja_paatoksenteko_opas_yrityksille.pdf

P. Dudek (2013), FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, Archives of metallurgy and materials, vol.58, issue 4, 1415-1418 s. Saatavissa: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/amm.2013.58.issue-4/amm-2013-0186/amm-2013-0186.pdf>

L. Novakova-Marcincinova, J. Novak-Marcincin, J. Barna, J. Torok (2012), Special materials used in FDM rapid prototyping technology application, Technical University of Kosice/Department of Manufacturing Technologies, Presov, Slovakia, INES 2012, IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems, June 13–15, 2012, Lisbon, Portugal 4 s. Saatavissa TTY:n tunnuksilla: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6249805>

FIT Additive Manufacturing Group (2017), Fit Group now able to produce XXL plastic parts by new AM technology [verkkouutinen], [viitattu 2.1.2018]. Saatavissa: <https://fit.technology/news.php?nid=213>

K. Paukkeri (2016), Kierrätyskumista ja polypropeenista valmistetun filamentin soveltuvuus 3D-tulostamiseen [Diplomityö], TTY, 54 s. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24451/paukkeri.pdf?>

H. Kangas (2014), Opas selluloosananomateriaaleihin, VTT. 97 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T199.pdf>

U. Ylönen (2017), Vallankumous rakennusteollisuudessa - talon voi kohta tulostaa suoraan tontille, Yle-Uutiset [verkkouutinen], [viitattu 31.05.2017]. Saatavissa: <http://yle.fi/uutiset/3-9596469>

Kakkonen-yhtiöt (2017), Fimatec Oy lanseeraa maailman suurimman 3D-tulostimen [verkkouutinen], [viitattu 31.05.2017]. Saatavissa: <http://www.k2.fi/fi/media/ajankohtaista/?news=view&newsID=71>

T. Marttila (2016), Tämä 3D-tulostin tekee lähes ihmeitä - Tulostaa metallista melkein mitä vaan [verkkolehti], [viitattu 31.05.2017]. Saatavissa: <https://www.aamulehti.fi/kotimaa/tama-3d-tulostin-tekee-lahes-ihmeita-tulostaa-metallista-melkein-mita-vaan-23951934/>

MX3D [kotisivu], [viitattu 31.05.2017]. MX3D, Saatavissa: <http://mx3d.com/>

E. Palermo (2015), How Robots Are Building a 3D-printed Metal Bridge in Amsterdam [verkkouutinen], [viitattu 31.05.2017]. Saatavissa: <http://www.livescience.com/52750-robots-build-3d-printed-bridge.html>

laac [kotisivu], [viitattu 31.05.2017], Institute of advanced architecture of Catalonia, Saatavissa: <https://iaac.net>

B. Stevenson, Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an incredible Home, [verkkouutinen], [viitattu 31.05.2017], 3Dprint.com, Saatavissa: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>

The Local - Spain`s News in English (2017), World`s first 3D-printed bridge opened in Madrid [verkkouutinen], [viitattu 31.05.2017].
Saatavissa: <https://www.thelocal.es/20170202/worlds-first-3d-printed-bridge-opened-in-madrid>

M. Ukonaho (2015), Composite structures 5K00CQ16 – kerroslevyt [TAMK opetusmateriaali].

Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 Liikenneviraston ohjeita 24/2014, Liikennevirasto.
Saatavissa: www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo_2014-24_ncci1_web.pdf#

Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2 Liikenneviraston ohjeita 13/2012, Liikennevirasto.
Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2014-25_ncci2_web.pdf

Eurokoodin soveltamisohje, Puurakenteiden suunnittelu - NCCI 5 Liikenneviraston ohjeita 25/2013, Liikennevirasto.
Saatavissa: www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2013-25_ncci5_web.pdf#

M. Mäkelä, L. Soininen, S. Tuomola, J. Öistämö (2013), Tekniikan kaavasto – 11. painos [kirja], Tammertekniikka. Saatavissa: www.tammertekniikka.fi.

Puuinfo (2011), Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje, kolmas painos. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/>

Eurokoodin soveltamisohje, Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu - NCCI 4 Liikenneviraston ohjeita 27/2016, Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2016-27_ncci4_web.pdf

LIITE A: UPM FORMI 3D-TEKNISET TIEDOT

Technical Specification



UPM Formi 3D

26.09.2017

Material	UPM Formi 3D is cellulose fiber filled plastic composite. Principal ingredients are specially selected cellulose fibers and native polylactide acid.		
Applications	UPM Formi 3D grades are developed for production of 3D printing filaments.		
Environment	UPM Formi 3D is manufactured from renewable cellulose fibers. Material can be burned for energy. All cellulose fibres are from certificated forests.		
Physical and mechanical properties	Property	Test method	Typical value
	Density, g/cm ³	EN ISO 1183	1,21
	Tensile strength, N/mm ²	ISO 527	28
	Tensile modulus N/mm ²	ISO 527	2600
	Strain (tensile), %	ISO 527	5
	Impact Strength, Charpy, kJ/m ²	ISO 179/1eU	24
	Peak melt temperature, °C	ISO 11357	140-180
	Glass transition temperature, °C	ISO 11357	64
	Melt flow index (granulates)*	ISO 1133	13
	Melt flow index (filament)*	ISO 1133	21
* 190 °C/10kg			
Blending	UPM Formi 3D grades can be used as such or blended with native polylactide acid.		
Colours	Lignin free fibres enable richer colors which, whilst gently lightening over time. The light color remain bright. In filament extrusion, recommended amount of added PLA-based color masterbatch is 0,75% or lower.		
Pretreatment	UPM Formi contains cellulose fibres which may absorb moisture if the package is open. Close the package at all times when possible. UPM Formi composite should be dried for minimum of 3 hours at 80 °C (dehumidifying dryer preferred).		
Safety	Maximum recommended processing temperature is 200 °C. Overheating may cause risk for thermal degradation. Auto-ignition of UPM Formi material is possible after purging the moulding machine. Recommended to purge into cool water. Product is non-flammable under normal conditions of storage, manipulation and use. In the case of inflammation as a result of improper manipulation, storage or use preferably use polyvalent powder extinguishers (ABC powder) or water, in accordance with the regulation on fire protection systems.		

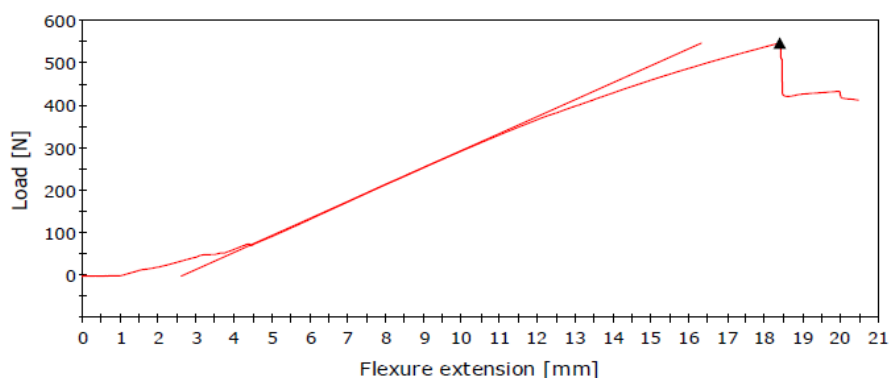
LIITE B: KOEKUORMITUSTULOKSET

1:15_60_octtet_vaaka_0,3_1mm

3 Point FLEXURE (BEND) test method.

Company	UPM-Kymmene Oyj
Laboratory Name	UPM Biocomposites R&D
Temperature (C)	20,00
Humidity (%)	65,00
Comment	1:6,7_20_rectilinear_vaaka_0,5_3mm

Flex Test



	Specimen label	Flexure load [N]	Flexure extension [mm]	Flexure strain [mm/mm]	Flexure stress [MPa]
1	1:6,7_20_rectilinear_vaaka_0,5_3mm	546,675	18,374	0,010	9,652
Mean		546,675	18,374	0,010	9,652
Standard deviation		-----	-----	-----	-----

	Modulus (Automatic) [MPa]	Width [mm]	Thickness [mm]	Time [s]
1	1321,454	118,00	18,00	110,2
Mean	1321,454	118,00	18,00	110,2
Standard deviation	-----	-----	-----	-----